EcCoGen

Eco Conception Générative

Rapport final et livrables

Programme ANR-10-Création-012

Responsable scientifique : Pr Jean Claude Bignon

Rédacteur du rapport : Philippe Marin

Avril 2013

Table des matières

1 INTRODUCTION.....7

2 CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE.....7

2.1 Contexte économique et social.....8
2.1.1 Contexte économique.....8
2.1.2 Le contexte social.....8
2.2 Le contexte environnemental.....8
2.3 Le contexte instrumental.....8
2.3.1 Les outils transformationnels inadaptés au processus créatif.....9
2.3.2 Limites contextuelles et cognitives de l'instrumentation numérique.....9

3 ETAT DE L'ART.....10

3.1 L'art évolutionnaire.....10
3.1.1 Introduction.....10
3.1.2 Méthodologie.....10
3.1.3 L'Art numérique et l'art génératif.....11
3.1.4 Etat des lieux de l'art évolutionnaire.....12
3.1.5 Limites et perspectives techniques.....24
3.1.6 Vers un hasard algorithmique opérationnel.....25
3.1.7 Conclusion.....26
3.1.8 Bibliographie.....26
3.2 Les environnements logiciels adaptés à une écoconception générative.....28
3.2.1 Objectifs.....28
3.2.2 État de l'art des environnements logiciels.....28
3.2.3 Caractérisation des solutions archétypales.....36
3.2.4 Conclusion.....38
3.2.5 Bibliographie.....38
3.3 Les méthodes informatiques évolutionnaires.....41
3.3.1 contexte et objectifs.....41
3.3.2 Optimisation de problèmes difficiles.....42
3.3.3 Bio-inspiration : l'évolution naturelle.....44
3.3.4 Algorithmes évolutionnaires.....47
3.3.5 De la sélection naturelle à la sélection artificielle.....50
3.3.6 Algorithmes évolutionnaires et créativité.....66
3.3.7 Annexe.....70
3.3.8 Références bibliographiques.....71
3.4 Les méthodes d'évaluation de la créativité.....75
3.4.1 Contexte et objectifs.....75
3.4.2 Créativité, Conception.....76
3.4.3 Méthodes d'évaluation de la créativité / conception créative.....83
3.4.4 Synthèse pour le projet EcCoGen.....94
3.4.5 Références bibliographiques.....95

4 MÉTHODE, CONCEPTION ET DÉVELOPPEMENT D'UN OUTIL.....100

4.1 Les Théories de la forme....100
4.1.1 Archétype et hylémorphisme, un regard philosophique....100
4.1.2 Esthétique, formes et perceptions....100
4.1.3 Morphogénèse et formalisme scientifique....103
4.1.4 Stratégies de morphogenèse architecturale....103
4.2 Ec-Co-Gen-N....114
4.2.1 Une approche par les patrons....114
4.2.2 Plateforme ec-Co-Gen....136
4.3 Ec-CO-Gen-L....141
4.3.1 Moteur morphogénétique – Approche par voxels....141
4.3.2 Moteur d'évaluation – Méthode des degrés Jours Unifiés....150
4.3.3 Algorithme génétique interactif multiobjectif aux solutions performantes et diversifiées....154
4.3.4 Application et utilisation Ec-Co-Gen-L – Manuel de formation des expérimentations Ec-Co-Gen-L....168

5 MISES EN SITUATION PÉDAGOGIQUE....178

5.1 Objectifs et protocole d'expérimentation....178
5.1.1 Principes généraux de construction des observations....178
5.1.2 Un travail en binômes, enregistré....178
5.1.3 Définition des séances de travail....179
5.2 Evaluation des qualités créatives de la performance créative et caractérisation de la créativité evolutionnaire....185
5.2.1 Protocole d'observation....186
5.2.2 Données liminaires....187
5.2.3 EcCoGen-L dans le processus créatif....196
5.2.4 EcCoGen-N dans le processus créatif....210
5.2.5 Perspectives de développement....216

6 CONCLUSION....218

6.1 Discussions, enjeux et prolongements :....218
6.1.1 Enjeux environnementaux et sociétaux....218
6.1.2 Enjeux en termes d'instrumentation de la conception....218
6.1.3 Formes et performances : du primat de la forme sur la performance à une mise en relations entre formes et performances....218
6.1.4 Sur le plan des outils prototpyaux développés :....219
6.1.5 Sur le plan méthodologique :....219
6.2 Conclusion....219

7 LISTE DES ACTEURS MOBILISÉS PAR LE PROJET....220

7.1 Laboratoire MAP-CRAI - Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy 220
7.2 Laboratoire MAP-ARIA - Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Lyon. .220
7.3 Codisant-Sitcom, Interpsy - Université Nancy 2....220

8 LISTE DES PUBLICATIONS....221

8.1 France, publications mono-partenaire :....221
8.2 France, publications multi-partenaires :....221

8.3 International, publications multi-partenaires :.....221
8.4 International, publications mono-partenaire :.....221
8.5 International, revue à comité de lecture :.....221
8.6 Actions de diffusion, conférences de vulgarisation :.....221

9 TABLE DES ILLUSTRATIONS.....222

1 INTRODUCTION

Le mémoire Eco-Conception Générative rassemble l'ensemble de la production scientifique du projet sous forme de rapports. Il est organisé autour de quatre chapitres. Il propose d'une part la reformulation des contextes et problématiques du projet, en précisant les enjeux sociaux et économiques, le contexte environnemental et la problématique d'instrumentation du processus de conception architecturale.

D'autre part, il présente quatre états de l'art principaux autour de l'art évolutionnaire, les environnements logiciels adaptés à la conception générative, les méthodes informatiques évolutionnaires et des méthodes d'évaluation de la créativité.

Dans un troisième chapitre, nous présentons le cadre de développement des outils mis en œuvre dans le projet. Ici, nous revenons sur les théories de la forme, l'architecture durable et sur l'approche par eco-modèles. Pour chacun des outils que nous avons mis en œuvre, nous présentons les moteurs morphogénétiques, les moteurs d'évaluation, les algorithmes, leurs interfaces graphiques et modalités d'interaction.

Enfin, dans notre quatrième chapitre nous présentons les expérimentations pédagogiques et les évaluations critiques issues de ces observations.

2 CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE

Notre proposition de recherche concerne la conception architecturale. Plus précisément encore, notre projet questionne les phases de recherche conceptuelle en architecture. Ces dernières révèlent une dimension créative importante, et leurs instrumentations numériques font depuis plusieurs années l'objet d'études et développements informatiques successifs.

L'intelligence artificielle et la psychologie cognitive ont établi les modèles théoriques sur lesquels les outils informatiques d'assistance à la conception ont fondé leur développement. Ces outils ont porté sur une recherche d'efficacité, d'optimisation et sur le parcours d'un espace de solutions établies. Ils ont conduit à la généralisation des systèmes à base de connaissances et des systèmes à base de contraintes.

Cependant ces outils révèlent aujourd'hui des limites quant à leurs efficiences à supporter une démarche créative. Les outils de modélisation sont essentiellement utilisés pour la représentation d'espaces ou d'ouvrages préalablement conçus. Leur valeur ajoutée est à situer beaucoup plus du coté de la communication que de celui de la création. Pour leur part, les outils de simulation sont avant tout des outils de contrôle de performance. Ils agissent comme des instruments de vérification plus que comme des outils de stimulation. Si la communication et la vérification portées par les outils numériques orientés architecture sont bien des fonctions nécessaires au processus de conception, elles ne sauraient être confondues avec les fonctions créatives également nécessaires au même processus.

Notre projet de recherche vise donc à définir une méthode et à développer un outil d'assistance à la conception de type génératif, dont le fonctionnement relève de mécanismes évolutionnaires susceptibles d'apporter une véritable aide à la création.

De plus nous portons cette instrumentation du processus de conception créative dans le contexte du développement durable et des économies d'énergie. Il apparaît en effet prioritaire aujourd'hui, dans les champs de l'architecture et de l'ingénierie de la construction, d'intégrer les paramètres et les contraintes du développement durable dans les démarches de conception, de création et d'innovation. La nécessité de la prise en compte de ces composantes, face à la crise énergétique et sociale qui se manifeste aujourd'hui, est associée à une complexification des enjeux caractérisés par des échelles spatiales et temporelles multiples et par l'interconnexion entre les problèmes et les contraintes. Ainsi le système de relations entre les paramètres et les variables d'un problème de conception s'est complexifié. Des outils génératifs d'assistance, facilitant le parcours de l'espace des solutions, améliorant la compréhension du problème dans une perspective de

stimulation créative, nous semblent nécessaires. Ces outils pourraient permettre une redéfinition des mécanismes cognitifs associés à ces processus numériques génératifs.

2.1 CONTEXTE ÉCONOMIQUE ET SOCIAL

2.1.1 CONTEXTE ÉCONOMIQUE

Le processus de conception architecturale se caractérise notamment par un phasage précis et réglementé par la loi MOP qui conduit des recherches conceptuelles jusqu'à la réception des ouvrages édifiés. Même si un travail de conception et de résolution est mené de manière continue, il est admis que les phases initiales d'esquisse définissent les orientations fondamentales du projet. Les choix opérés pendant cette exploration créative sont décisifs, et leurs remises en question ultérieures sont lourd et coûteux. Ainsi il nous paraît important de pouvoir convoquer et de s'appuyer sur les contraintes notamment énergétiques le plus rapidement possible pour faciliter une création architecturale adaptée aux contextes. Nous proposons donc un processus de conception créatif fondé sur la question du durable à travers une instrumentation générative des phases de recherche conceptuelles.

2.1.2 LE CONTEXTE SOCIAL

Le rôle de l'architecte au sein du projet est à la fois complexe et varié. Il est avant tout le concepteur originel, celui qui énonce le «concept» ou le «parti» qui guidera le projet de conception. Il est aussi le mandataire de la maîtrise d'œuvre et c'est sans doute ce rôle qui est le moins évident à assumer. En effet, pour comprendre ce rôle, il faut rappeler le contexte de la coopération : «La qualité architecturale n'est pas la qualité cumulée de toutes les disciplines associées à la conception ; ce qui compte est l'affirmation d'une intention globale et cohérente. Dans un secteur où chacun tend à limiter sa responsabilité et son intervention, l'architecte apparaît parfois comme le seul protagoniste désireux d'atteindre cet objectif.» (Malcurat 2001). Ainsi, l'architecte doit prendre des décisions et arbitrer les conflits tout en respectant les contraintes du site et celles énoncées par le maître d'ouvrage (Farel 1995). Son rôle ne se résume pas à celui d'un négociateur à l'intérieur d'un réseau où tous les acteurs seraient à un niveau égalitaire face à la conception (Raynaud 2001). L'architecte possède bien le rôle central dans la conception. Il conçoit, synthétise, coordonne, négocie, modère afin de garder le cap fixé : faire émerger un projet cohérent. Un outillage approprié devrait faciliter la consolidation des choix dès les premiers temps de la conception.

2.2 LE CONTEXTE ENVIRONNEMENTAL

La question des enjeux environnementaux est aujourd'hui au centre des stratégies de conception architecturale. Les accords de Rio et de Kyoto fixent les objectifs de limitation de gaz à effet de serre. La France s'est engagée à réduire la consommation d'énergie des bâtiments qui contribuent pour 42% à la consommation énergétique et pour 25% à la production de gaz à effet de serre. Ce phénomène entraîne un réchauffement climatique. L'empreinte écologique de l'activité humaine à l'échelle mondiale entraîne une exploitation des ressources qui dépasse de 25% les capacités biologiques de la terre. Face à cette prise de conscience des problèmes environnementaux, la France a mis en place un « Grenelle ». Celui-ci fixe des objectifs et des mesures notamment en matière de renforcement de la réglementation thermique, l'encouragement des innovations et la mobilisation de la société autour des économies d'énergie. On peut considérer que la Réglementation Thermique (RT) est en France le fer de lance réglementaire de la maîtrise énergétique des édifices. Les exigences de cette dernière sont progressivement renforcées, consommation énergétique moyenne fixée à moins de 110kWh/m2/an en 2008, Bâtiment à Basse Consommation (BBC), correspondant à moins de 50kWh/m2/an en 2010 pour les bâtiments publics et tertiaires, généralisée à tous les bâtiments en 2012, Bâtiment à Energie Positive (BEPOS) en 2020. La question énergétique devient donc aujourd'hui particulièrement critique dans les réflexions sur le cadre bâti.

2.3 LE CONTEXTE INSTRUMENTAL

Depuis plusieurs années l'outil informatique a investi tous les domaines de la conception et de la création. Ces outils numériques sont notamment utilisés pour leurs capacités à assister la représentation virtuelle d'un environnement anticipé, pour leurs capacités à assister une analyse basée sur l'évaluation et la simulation des performances, pour leurs capacités à aider à la prise de décision dans l'implémentation de système à base de connaissances. Nous avons identifié les freins et les limites de ces modes d'utilisation dans un processus de conception créative associé aux phases initiales du travail de conception architecturale.

2.3.1 LES OUTILS TRANSFORMATIONNELS INADAPTÉS AU PROCESSUS CRÉATIF

La représentation informatique n'offre en général qu'un seul niveau de représentation, basé sur un modèle géométrique, lié directement au point de vue qu'il privilégie : volumes extérieurs, espaces intérieurs, structures portantes, réseaux des flux. Entre ces points de vue, il n'y a pas ou peu d'interaction. Françoise Darses (Darses 1994) rappelle que l'évaluation systématique des outils de CAO dans les processus de conception créative révèle qu'ils introduisent dans l'activité de conception des exigences qui altèrent la part créative du travail de conception : la prise d'information des utilisateurs est canalisée vers des contenus précis et l'exécution du dessin prend le pas sur l'analyse du problème. Imposant généralement de suivre un plan de résolution prédéterminé, les systèmes CAO renforcent la planification hiérarchique de la résolution du problème, ils rendent impossibles l'application de stratégies incertaines et la manipulation d'objets flous, comme les brouillons, les surcharges ou les croquis. Ce « modèle transformationnel » n'est pas adapté aux caractéristiques d'un processus créatif.

2.3.2 LIMITES CONTEXTUELLES ET COGNITIVES DE L'INSTRUMENTATION NUMÉRIQUE

Pierre Leclerq (Leclerq 2005) illustre cette inadéquation. Le rendu 3D avec une animation permettra d'évaluer la qualité des formes et des espaces ou de vérifier quelques contraintes dimensionnelles ; la modélisation de la structure porteuse validera la stabilité de l'édifice ; la modélisation thermodynamique des locaux et de leurs parois permettra d'évaluer les besoins énergétiques du bâtiment. Ces encodages sont cependant longs et rébarbatifs, ils exigent un certain degré d'expertise et en même temps l'explicitation intégrale du modèle à tester. Ils interviennent donc toujours après la conception préliminaire ou bien ils ne traitent que d'une infime portion du nombre de paramètres. Il s'agit donc d'un apport spécialisé, distribué entre des acteurs sectoriels dans un processus linéaire de répartition des responsabilités. Nous notons deux types d'inadéquation prégnante dans un processus créatif associé aux phases initiales de la conception (Huot 2005) : l'inadéquation contextuelle, liée à la complexification des interfaces et l'inadéquation cognitive, liée à la nécessaire univocité du modèle numérique alors même que l'activité de recherche créative implique une définition progressive de l'objet en étude.

Les études en psychologie cognitive ont conduit à l'identification de principes ergonomiques nécessaires aux développements des systèmes d'assistance dans les phases amont de la conception (Flemming 1997): faciliter l'interaction gestuelle, permettre l'entrée de données imprécises, autoriser le passage entre niveaux de représentation, aider la comparaison entre différents concepts de solutions, faire des suggestions, aider à évaluer. De nombreux travaux et les développements récents des outils logiciels tentent de répondre à ces principes ergonomiques notamment en améliorant les fonctionnalités d'interaction homme-machine : manipulation multi-vues du modèle géométrique, représentation « altérée » ou évocatrice de l'objet en reprenant des codes de graphiques appropriés. Cependant il apparaît ici que le prolongement des techniques de dessin à la main dans le champ du numérique n'admet pas une transposition des qualités créatives du croquis.

Ainsi, il nous semble pertinent de proposer de nouvelles modalités d'assistance du processus de création fondées sur des mécanismes génératifs dans lesquelles l'outil devient un moteur de propositions pour le concepteur ainsi qu'un support de sa représentation mentale.

3 ETAT DE L'ART

3.1 L'ART ÉVOLUTIONNAIRE

Auteurs :
Philippe Marin, MAP-ARIA/MAP-CRAI
Xavier Marsault, MAP-ARIA

Ce chapitre établit l'état des lieux de l'art évolutionnaire et permet d'identifier les expérimentations remarquables, dont les caractéristiques pourront être intégrées à nos développements ultérieurs. Les limites des algorithmes génétiques interactifs et la difficile modélisation d'une évaluation des composantes sensibles sont notamment identifiées. La redéfinition de la place de l'auteur et la convocation d'un « hasard contrôlé » sont commentées.

3.1.1 INTRODUCTION

Cet état des lieux porte un regard sur les disciplines qui constituent le vaste univers de la création. Ce sont plus particulièrement les expérimentations évolutionnaires conduites dans les disciplines de l'art visuel, de la vidéo, du design et de la musique qui sont analysées ici. Nous nous attachons à définir quels sont les orientations et les résultats obtenus dans chacune de ces disciplines. Plus particulièrement nous portons un double regard conceptuel et technique sur ces travaux et nous identifions trois notions principales. D'une part, la qualification de la créativité artificielle et la place de l'auteur dans un processus de création autonome qui sont au centre de ces travaux. D'autre part, la question de l'évaluation automatique des qualités esthétiques et plastiques des artefacts en évolution est posée et des tentatives de réponse sont données. Enfin, l'interaction humaine dans le processus d'évaluation des analogons reste une modalité prégnante dans les dispositifs de créativité évolutionnaires, elle se traduit par la mise en œuvre d'algorithme interactif appelé IGA[1].

Dans un premier chapitre, nous nous proposons de repositionner les pratiques évolutionnaires dans l'histoire de l'art et nous rappelons les origines historiques des mouvements artistiques qualifiés d'art numérique et d'art génératif. Dans un deuxième chapitre, nous présentons une série d'expérimentations menées dans les champs de la création. Le chapitre « limites et perspectives techniques » revient sur les caractéristiques des dispositifs IGA et rassemble une critique générale des tentatives d'évaluation automatique. Le chapitre « vers un hasard algorithmique opérationnel » précise la redéfinition de la notion d'auteur et qualifie le hasard en tant que générateur de création.

3.1.2 MÉTHODOLOGIE

Cet état de l'art est construit à partir de l'analyse d'une vingtaine de publications réorganisées en fonction des types d'artefacts manipulés. Ainsi nous les regroupons en trois catégories, d'une part les expérimentations qui portent sur des représentations 2D, d'autre part celles qui portent sur des représentations 3D et enfin celles qui concernent la musique évolutionnaire. Pour chacun des projets présentés nous nous attachons à une description du dispositif et nous identifions les particularités remarquables qui pourraient aider la définition de notre propre dispositif évolutionnaire. Les descriptions sont complétées dans la majorité des cas d'une image d'illustration.

---

1 Interactive Genetic Algorithm

La revue de littérature relative à la musique évolutionnaire est basée sur l'étude de 10 articles de recherche récents (2001-2009), sélectionnés parmi 15 au départ, et qui présentent d'abord les algorithmes génétiques (AG) comme des mécanismes de recherche pour la créativité musicale, plus que d'optimisation de qualités mesurées.

3.1.3 L'ART NUMÉRIQUE ET L'ART GÉNÉRATIF

3.1.3.1 ANCRAGE HISTORIQUE

L'art numérique est étroitement associé à l'explosion des médias numériques depuis les années 60. La terminologie employée pour qualifier ces pratiques reste encore imprécise, nous rencontrons les termes d' « art informatique » ou d' « art multimédia », l' « art numérique » prenant généralement place au sein des « nouveaux médias », catégorie regroupant les pratiques cinématographiques, vidéastes, sonores ou d'autres formes hybrides (Paul, 2004). Les technologies utilisées sont nées au sein des laboratoires militaires et ont trouvé dans un premier temps des applications universitaires et stratégiques. Ainsi l'art numérique s'inscrit dans un double rapport avec l'histoire des sciences et des technologies d'une part et les influences artistiques d'autre part. Sans vouloir développer les imbrications du complexe militaro-industriel et de la culture de consommation de masse dans l'émergence de l'art numérique, nous mettrons en exergue les mouvements artistiques qui constituent dès le début du XXe siècle un socle théorique pour les pratiques numériques.

Les liens avec les mouvements artistiques antérieurs, comme Dada, Fluxus et l'Art Conceptuel, se tissent à travers les rapports privilégiés que ces mouvements entretiennent avec la définition d'instructions formelles comme génératrice de créativité, l'importance du concept et de l'abstraction, la place du hasard et la participation du visiteur.

Les travaux de Marcel Duchamp (1887-1968) sont considérés comme précurseur à plusieurs égards. Le passage de l'objet au concept, récurrent dans de nombreuses œuvres, anticipe les mécanismes de « virtualité » que l'on retrouve traduits dans les dispositifs numériques. L'implication du visiteur et la dimension interactive[2] des œuvres de Duchamp annoncent également les installations numériques et électroniques. La question du hasard générateur est également prégnante chez l'artiste. L'œuvre intitulée « *Trois stoppages-étalon* » de 1913 est décrite par l'artiste lui-même : « Si un fil droit horizontal d'un mètre de longueur tombe d'un mètre de hauteur sur un plan horizontal en se déformant à son gré et donne une figure nouvelle de l'unité de longueur » (Duchamp, 1994). Ici le hasard comme procédé créatif porte l' « idée de fabrication » tant au niveau théorique que plastique.

Les sculptures lumineuses de Moholy-Nagy (1895-1946) construisent des volumes immatériels, c'est la mise en mouvement de ces structures lumineuses qui dessinent les contours, en représentant la trajectoire de la source lumineuse, et dont l'effet peut être interprété comme une forme volumique éphémère. L'œuvre virtuelle trouve ici une matérialisation dans son activation.

3.1.3.2 RÈGLES FORMELLES COMME MÉCANISME CRÉATIF

[2] « *Rotative Plaque de verre, optique précision* », crée en 1920 en collaboration avec Man Ray, est un dispositif optique dont la mise en mouvement est réalisée par le visiteur, qui peut ensuite observer les effets engendrés. L'œuvre est ici activée par le spectateur.

Les procédés de poésie dadaïste que l'on retrouve notamment dans les travaux de l' « OULIPO[3] » sont caractéristiques de cette inspiration créatrice soumise au calcul et aux combinaisons. Le poème naît de la construction et de l'assemblage de variations aléatoires de mots et périphrases. Les œuvres deviennent le fruit d'un processus aléatoire basé sur la définition de règles et instructions formelles dont le contrôle est renvoyé à la définition du processus.

Les travaux de John Cage (1912-1992), dans les années 1950 et 1960, exploitent le concept d'instructions combinées au hasard dans ses compositions musicales. Les parties structurelles prédéfinies de ses œuvres sont remplies par des sons préexistants. C'est un principe de « *non-intentionnalité* » que John Cage formule (Brecht, 2002).

L'exposition *Cybernetic Serendipity* organisée en 1969 à l'Institut d'Art Contemporain de Londres, rassemble une série d'expérimentations artistiques et scientifiques, plus sous le mode du documentaire que de l'œuvre d'art, et permet d'explorer les relations entre technologie et créativité. Organisée en trois thématiques – *computer generated work , cybernetic devices-robots, painting machines* et *machines demonstrating use of computer and history of cybernetics* - l'exposition questionne l'esthétique mécanisée à travers des générateurs poétiques et graphiques dans une logique de système ouvert et interactif largement orienté vers la définition de processus (MacGregor, 2002).

L'idée que des instructions procédurales deviennent les mécanismes générateurs de créativité est clairement associée aux approches algorithmiques qui composent les opérations logicielles des dispositifs numériques contemporains. L'idée du « hasard contrôlé » est développée dans la dernière partie de ce document.

3.1.3.3 L'ART GÉNÉRATIF

L'art génératif s'entend comme une spécialisation de l'art numérique dans lequel « les formes délivrées au public sont réalisées spontanément, créées au fur et à mesure par un mécanisme automatique » (Aziosmanoff, 2010). Nous reprenons la définition suivante : L'art génératif se réfère à tout art dans lequel l'artiste utilise un système, une grammaire de forme, un programme informatique, une machine ou d'autres mécanismes procéduraux, dans lequel ceux-ci présentent un degré d'autonomie dans l'élaboration de la forme finale. Si un système génératif est un système qui va agir de manière incrémentale sur une structure de données, on trouve comme modèles les plus anciens, les automates cellulaires ou les IFS[4] qui regroupe les systèmes à base de grammaire tels que les L-systems (Luga,). Nous pouvons classer dans cette catégorie les systèmes évolutionnaires.

Si l'art génératif prend ses racines dans l'histoire de l'art, celui-ci connaît une nouvelle étape avec l'apparition, dans les années 1980 des premiers artistes-chercheurs qui participèrent à l'invention de l'image de synthèse. Nous en décrirons les travaux dans les paragraphes suivants.

Il nous faut finalement noter le nombre croissant d'institutions culturelles, en Europe, aux Etats-Unis ou en Asie, qui portent aujourd'hui les thématiques de l'art numérique : le NTT Intercommunication Center (ICC) à Tokyo, le Center for Culture and Media (ZKM) à Karlsruhe en Allemagne, Ars Electronica à Linz en Autriche. Ainsi que des festivals ou manifestations internationales : European Media Arts Festival à Osnabrück en Allemagne, Next 5 Minutes à Amsterdam aux Pays-Bas.

3.1.4 ETAT DES LIEUX DE L'ART ÉVOLUTIONNAIRE

[3] Ouvroir de Littérature Potentielle, association d'artistes et d'écrivain fondée en 1960 par Raymond Queneau et François Le Lionnais

[4] Iterated Function Systems : Systèmes incrémentaux basés sur la répétition d'une fonction dans un environnement

Les expérimentations en matière d'art évolutionnaire sont regroupés en 3 catégories distinguant les types d'artefacts manipulés, artefacts 2D, artefact 3D et musique. Chacune de ces catégories est ensuite subdivisée en sous-catégories spécifiques. Nous trouvons pour ce qui concerne les représentations 2D : les peintures et représentations abstraites, les films et images de synthèse, les textures et images stylisées, les dessins et la typographie. Les objets 3D rassemblent des expérimentations qui concernent l'univers des biens de consommation et du design industriel. L'analyse de la littérature attachée à la musique évolutionnaire est présentée de manière synthétique en rassemblant les heuristiques mises en œuvres dans les projets rencontrés ainsi que les particularités de la mécanique évolutionnaire associée à cette discipline.

3.1.4.1 ARTEFACT 2D

3.1.4.1.1 PEINTURE ET REPRÉSENTATIONS ABSTRAITES

Biomorphes (1980)

Le projet Biomorphes a été développé par Charles Dawkins dans les années 1980 , l'auteur est un biologiste anglais qui s'intéresse de près aux questions de l'évolution.

Richard Dawkins a mis en œuvre un algorithme récursif initialement utilisé pour construire des structures arborescentes, la manipulation des paramètres fait émerger un paysage de formes spectaculaires dont l'univers de référence dépasse le seul vocabulaire des arbres et permet l'exploration de formes aussi diverses que des insectes, des branches ou des structures abstraites. L'expérience de Dawkins illustre la possibilité de générer à travers la manipulation de quelques règles simples un univers formel très large permettant la génération de vocabulaires variés dont certaines extensions résonnent avec les structures biologiques ou naturelles.

La proposition de Dawkins s'apparente à un algorithme évolutionnaire interactif (IGA)[5], l'algorithme affiche un individu et l'ensemble des formes mutées associées. Ici les mutations sont limitées, pour chacun des individus présentés seul un gène a subi une mutation. L'interaction et les sélections successives des individus par l'utilisateur facilitent l'exploration récursive de l'espace des solutions en permettant au concepteur de guider et d'orienter l'évolution dans une direction donnée. Cette sélection progressive de chacun des composants est appelée « *sélection cumulative* ».

[5] Algorithme évolutionnaire interactif repose sur l'intervention humaine pour opérer les fonctions de sélection des individus. Les valeurs esthétiques ou plastiques étant particulièrement délicate à modéliser, nous retrouvons fréquemment l'utilisation des IGA dans les dispositifs d'art évolutionnaire.

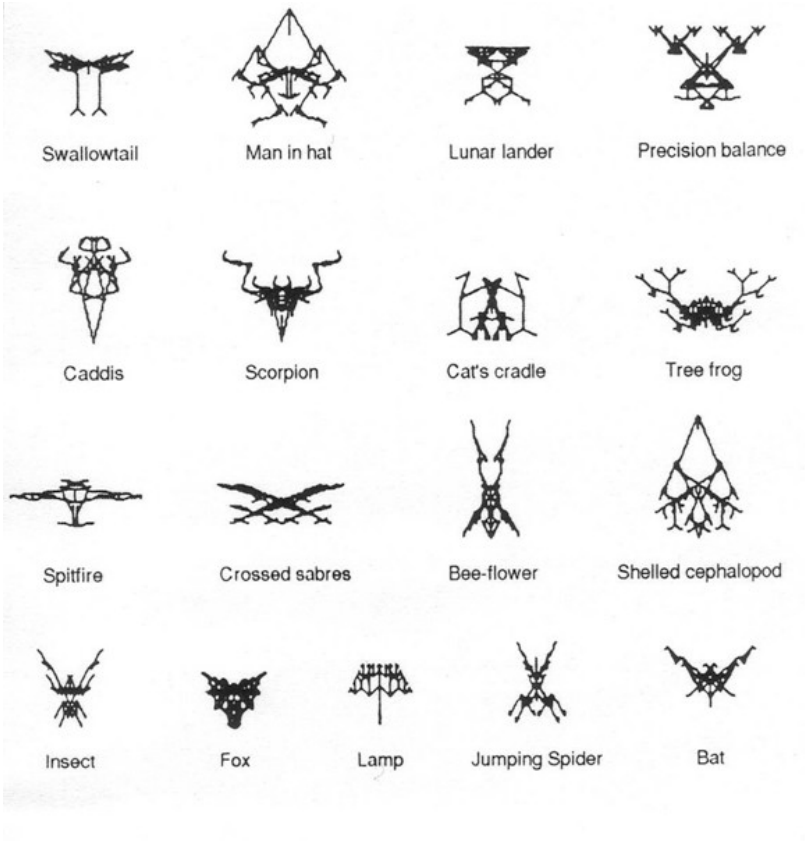


Figure 1. Paysage des solutions

Dawkins tire des enseignements de ses travaux qui portent notamment sur l'importance de l' « *évolution de l'évolutivité* » chez les espèces naturelles. Ainsi la dynamique évolutive ne se limiterait pas aux mécanismes de sélection naturelle par croisement et mutation, mais porterait également une capacité à faire évoluer l'évolution en modifiant par exemple le nombre de gênes définissant une espèce. La morphogenèse de Dawkins s'intègre alors dans une « *dynamique évolutive* ».

Life spacies (1997-1999)

« *Life spacies* » est un projet des artistes Sommerer et Mignonneau (Paul, 2008) qui propose en 1997 et 1999 un système de transcription de texte en forme abstraite, le message écrit devient code génétique et se traduit par une créature visuelle. Le projet est présenté au NTT Intercommunication Center de Tokyo et une description du projet est consultable sur le site internet du musée[6].

D'une manière similaire au code génétique dans la nature, des lettres, la syntaxe et le séquençage du texte sont utilisés pour coder et traduire certains paramètres dans des formes. Morphologie, couleur, texture, structure et membres sont influencés par les caractéristiques du texte initial. Les textes générateurs sont écrits par les spectateurs et envoyés électroniquement. La variété des sources engendre une variété des résultats formels.

La création n'est pas plus comprise comme l'expression de la créativité des artistes mais devient plutôt un processus intrinsèquement dynamique qui est basé sur les paramètres d'interaction ainsi que sur le processus évolutif mis en œuvre.

[6] http://www.ntticc.or.jp/lifespacies_en/

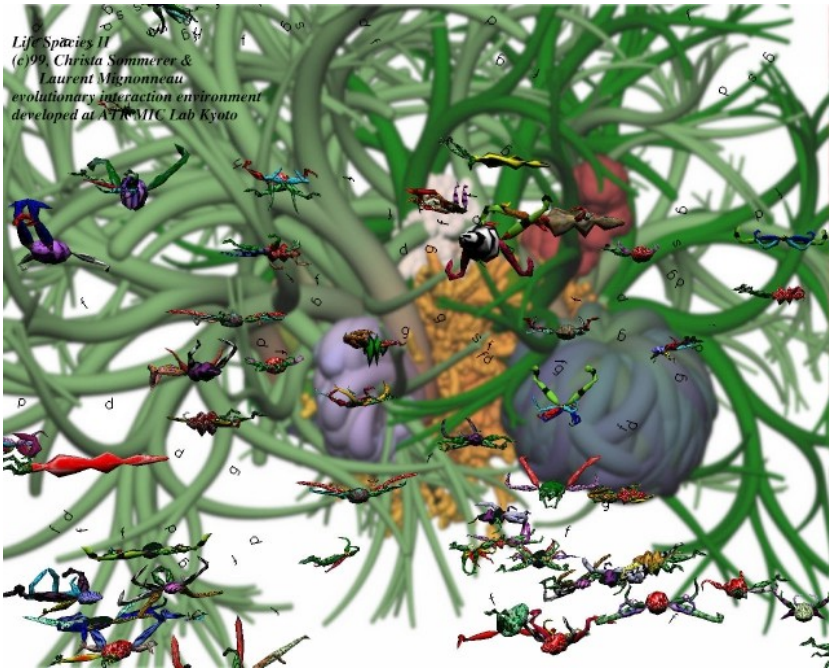


Figure 2. Life Spacies 1997-1999

E-volver (2006)

En 2006, la Fondation Art and Public Space d'Amsterdam a présenté l'installation « *E-volver* »[7] des artistes Driessens et Verstappen. L'installation consiste à la croissance de quatre graines, représentant quatre conditions initiales. Les graines se transforment en organismes cellulaires qui évoluent individuellement, se déplacent de pixels en pixels et change de couleur en fonction de l'état des cellules voisines. E-volver fonctionne sur la base d'un automate cellulaire. Les visiteurs peuvent influencer le comportement de l'automate à l'aide d'un écran tactile. L'évolution des organismes est conduite à l'aide de techniques évolutionnaires.

[7] Une présentation détaillée du projet peut être trouvé sur les site internet http://notnot.home.xs4all.nl/E-volverLUMC/E-volverLUMC.html et http://www.skor.nl/artefact-2429-nl.html?lang=en

Figure 3. Vue de l'interaction tactile avec E-volver

3.1.4.1.2 FILMS ET IMAGES DE SYNTHÈSE

Anyflo (1989)

Michel Bret, artiste, mathématicien, chercheur à l'Université Paris 8, est cofondateur de l'ATI (Art et Technologie de l'Image). Il réalise, dès les années 1985, une série de films à l'aide d'un logiciel de synthèse *Anyflo* (Bret, 1986). Les films montrent des personnages et des formes abstraites dansant dans des univers fantastiques. Le film *Automappe*[8] reçoit plusieurs prix : Prix de la critique et prix de la friction à Imagina 89 (Monte Carlo), 1er prix catégorie Art à Images du Futur 89 (Montréal), Grand Prix de l'œuvre Créative à Parigraph 89 (Paris). Chaque film porte sur une recherche technique et formelle. Des processus autonomes et génératifs construisent formes, objets ou personnages, qui entrent en interaction et évoluent.

Michel Bret propose le néologisme « *connecvolution* » , comme synthèse du connexionnisme[9] et de l'évolutionnisme, et décrit ainsi les systèmes capables de créer artificiellement. Avec cette nouvelle forme de création artificielle se trouve reposée la question de la créativité artificielle, naturelle et humaine.

[8] Automappe est consultable sur le site des archives vidéo de l'Université Paris 8 : http://www.archives-video.univ-paris8.fr/video.php?recordID=212

[9] Le connexionnisme est une approche utilisée en science cognitive, elle modélise les phénomènes mentaux et comportementaux comme des processus émergents à l'intérieur de réseaux d'unités simples interconnectées. L'approche apparaît dans les années 1980 en tant qu'alternative au computationisme.

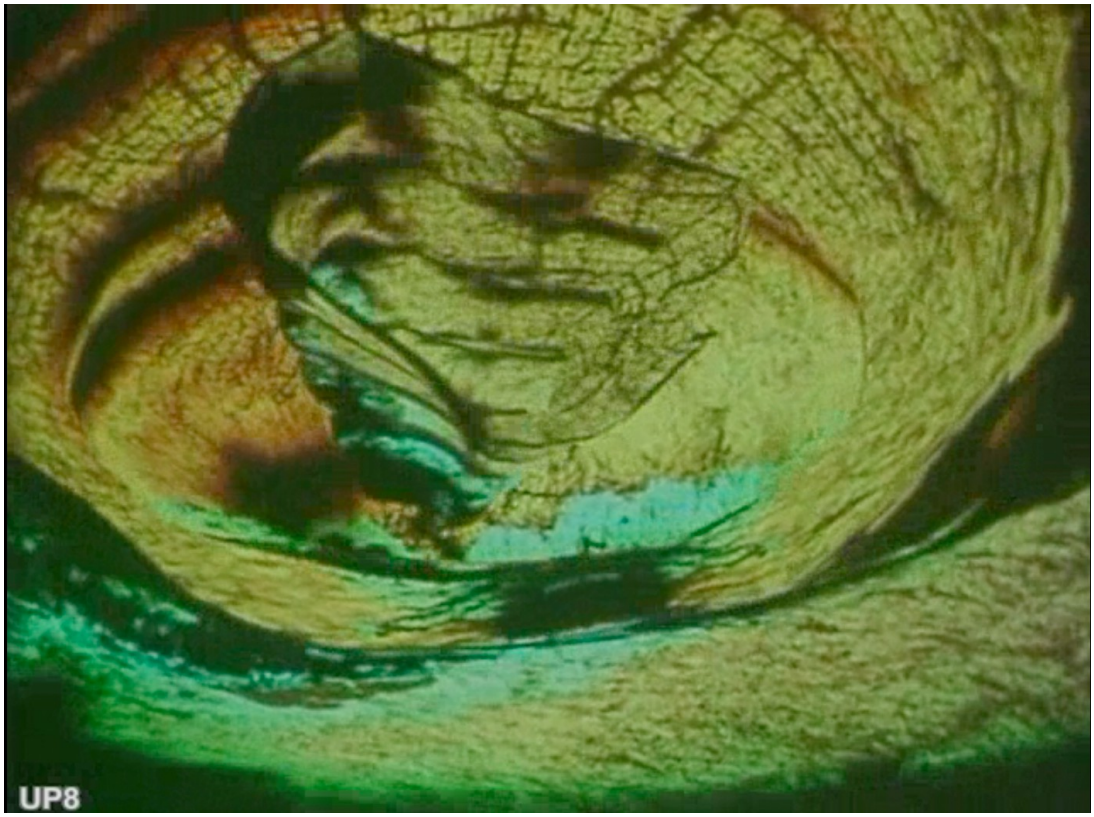


Figure 4. Capture du film *Automappe*

Mutator (1990)

L'artiste anglais William Latham travaille à la même époque sur le film « *A sequence from the evolution of form* » et ouvre la voix à ce qu'il appelait lui-même l' « *art génétique* ». Il obtient le 1er prix de la catégorie Recherche à Imagina (Monte Carlo) en 1990. Produit à l'aide du logiciel *Mutator*, le film montre avec une grande qualité de détails et de synthèse des formes abstraites qui évoluent en fonction de critères esthétiques et de sélections opérées par le visiteur (Aziosmanoff, 2010).

Galapagos (1997) et Images Génétiques (1993)

Karl Sims présente en 1993 au Centre Georges Pompidou, dans le cadre du cinquième numéro de la « Revue Virtuelle », l'installation *Images Génétiques* (Sims, 1994a; Sims, 1994b). En 1997, il présente *Galapagos* seconde installation sur le même thème. Dans chacune de ces œuvres, une série de moniteurs diffuse des formes abstraites, construites à l'aide de formules mathématiques, qui évoluent par croisement et mutation. Des dispositifs d'interaction constitués de pédales permettent aux visiteurs d'interagir et d'orienter le processus de sélection. À défaut d'une interaction en temps réel, il s'agissait plutôt de faire prendre conscience au spectateur de son influence et des interactions possibles avec un mécanisme génératif. Le rôle de l'artiste est remis en question.

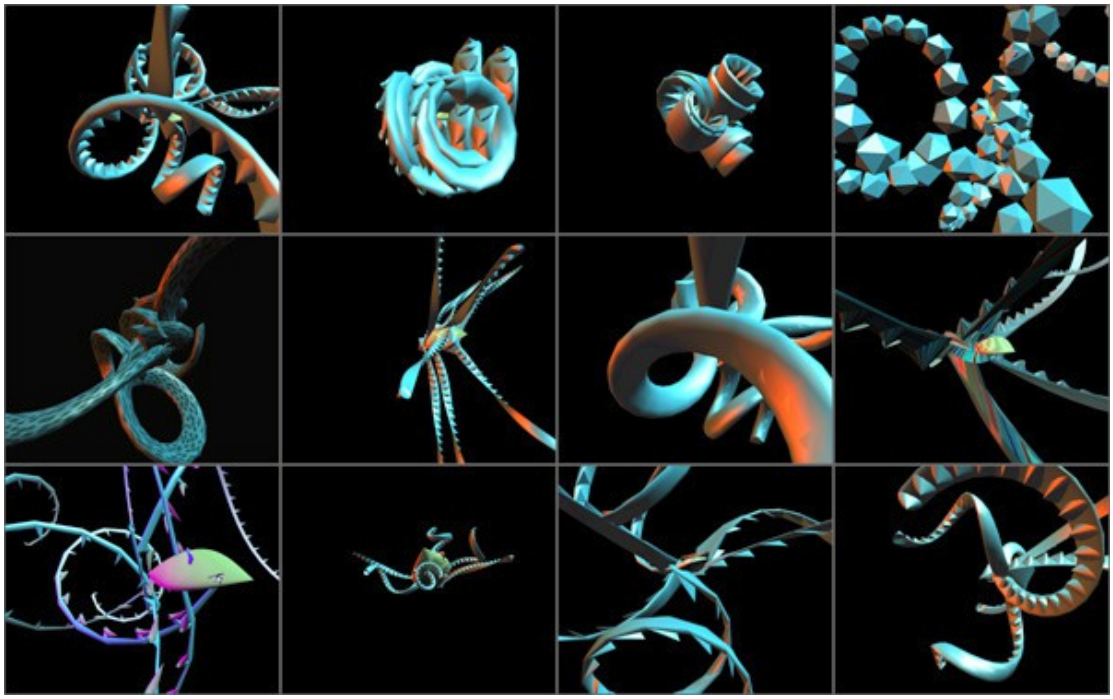


Figure 5. Galapagos 1994

3.1.4.1.3 TEXTURES ET IMAGES STYLISÉES

JNetic (2009)

JNetic est un projet développé par Steven Bergen et Brian J. Ross (Bergen & Ross, 2010), il porte sur un dispositif d'évolution d'images 2D utilisées comme images textures ou dans une perspective de stylisation de l'image. Une des problématiques portées par les auteurs repose sur la comparaison de la méthode de Pareto à celle d'une fonction multi objectif par pondération comme mécanisme informatique d'évaluation. Ainsi les auteurs privilégient une évaluation successive et hiérarchique de chacune des composantes de la fonction d'évaluation. La méthode de Pareto pouvant conduire à l'émergence de solutions hétérogènes, c'est-à-dire se révélant excellentes sur certains aspects mais particulièrement inadaptées sur d'autre. Dans le domaine d'application identifié, une performance moyenne minimale est privilégiée et la méthode basée sur une fonction d'évaluation multi objectif par pondération semble plus adaptée.

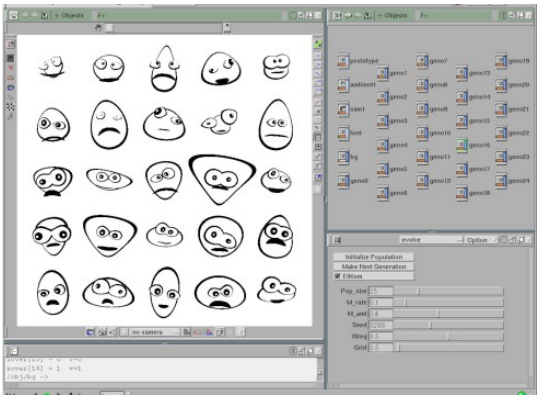
Figure 6. Exemples de résultats de génération d'images stylisées

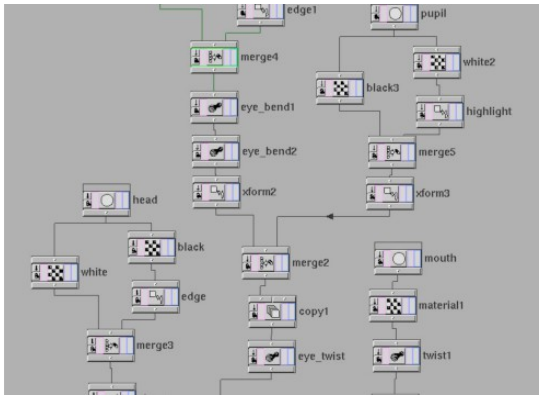
Les travaux portant sur la génération d'images textures sont nombreux et nous renvoyons à l'ouvrage de Romero (Romero & Machado, 2007) pour un état de l'art plus complet.

3.1.4.1.4 DESSINS 2D

Metavolve - Evolving Cartoon Faces (2000)

Matthew Lewis (Matthew & Phd, 2000) explore les systèmes de « *conception évolutionnaire esthétique*[10] » et propose un outil génératif permettant la construction de visages dont le style est associé au dessin animé. L'outil mis en œuvre est lui-même une extension du logiciel d'animation *Houdini*[11], et porte le nom de *Metavolve*. Une première modélisation du visage est réalisée à l'aide du logiciel *Houdini*, puis celle-ci est associée à l'interface *Metavolve*. La construction initiale est basée sur un modèle hiérarchique à base de graphes, appelé « *Directed Acyclic Graph* » (*DAG*). Les nœuds du graphe représentent les primitives géométriques ainsi que les actions de déformation ou déplacement de ces dernières. Ainsi une correspondance est établie entre phénotype et génotype, qui prend ici la forme d'un *DAG*. *Metavolve* trouve d'autres applications dans les domaines de l'animation, notamment avec la construction de populations d'avatar humain.





[10] Aesthetic Evolutionary Design (AED)

[11] Le site internet de l'éditeur est consultable à l'adresse http://www.sidefx.com/

Figure 7. Interface et représentation du DAG

EvoFit (2004)

EvoFit est un projet conduit par Charlie Frowd et porte sur la mise en œuvre de techniques évolutionnaires pour faciliter la reconstitution de portraits robots. Cet outil trouve des applications dans le domaine des enquêtes criminelles et nous notons que son utilisation est aujourd'hui passée au stade de l'exploitation commerciale. Le principe de l'outil repose sur le fait que la construction de plusieurs portraits associés dans un second temps à l'aide de techniques de morphose[12] facilite la reconstruction des visages. La victime évalue globalement plusieurs propositions qui successivement sont associées et fusionnées pour tendre progressivement vers la représentation mémorisée.

These are faces with random features. Touch 4 faces which look most like the man's starting with the best. Press [Reselect] to change your mind.
Reselect
Evolve

Figure 8. Interface et extrais de portraits

3.1.4.1.5 TYPOGRAPHIE

Genotyp (2004)

Genotyp est un projet développé par Michael Schmitz et Joachim Sauter (Schmitz, 2004) il vise la construction de figures typographiques à l'aide de mécanismes évolutionnaires. À partir de la sélection de un ou plusieurs modèles typographiques initiaux, l'utilisateur peut construire par croisements successifs de nouvelles figures. L'application est accessible par internet et l'interface utilisateur permet par glissé/déposé de combiner les différentes propositions disponibles. La représentation phylogénétique est interactive et facilite la compréhension de l'héritage des propriétés formelles. Le détail du phénotype et sa correspondance génotypique sont également accessibles via l'interface logicielle.

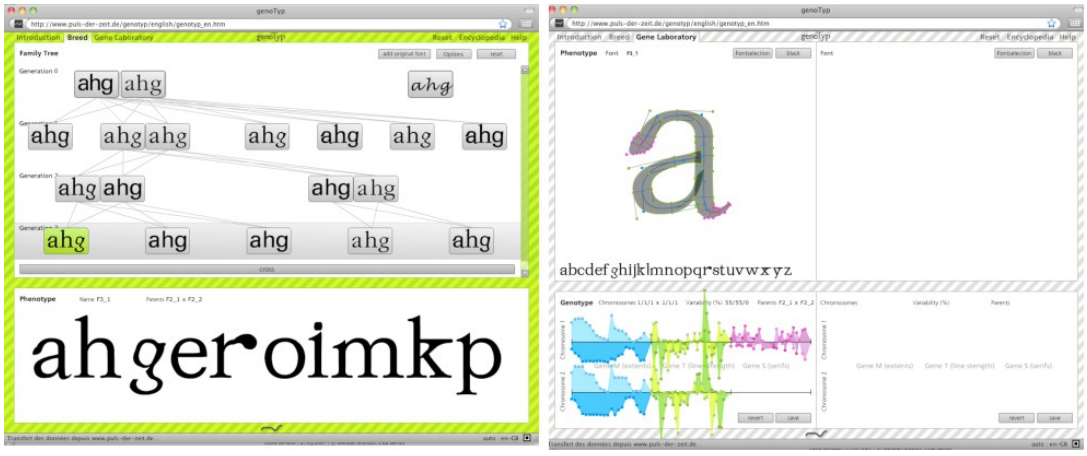


Figure 9. Interface de GenoType

[12] Le terme anglais « morphing » est plus couramment utilisé.

3.1.4.2 ARTEFACT 3D

Wine Glass Generator (2001)

Avec le projet *Wine Glass Generator*, John Frazer et ses collègues explorent les mécanismes évolutionnaires appliqués au domaine des objets et associés aux phases de recherche conceptuelle. Il propose une « structure évolutionnaire flexible[13] », présentée initialement en 2000, permettant de décrire la géométrie de l'objet en conception et autorisant son évolution génétique. Cette structure prend la forme d'un réseau hiérarchique dont chaque élément peut évoluer indépendamment et compose la description de l'objet. Ici le concepteur accède et manipule différents niveaux de représentation.

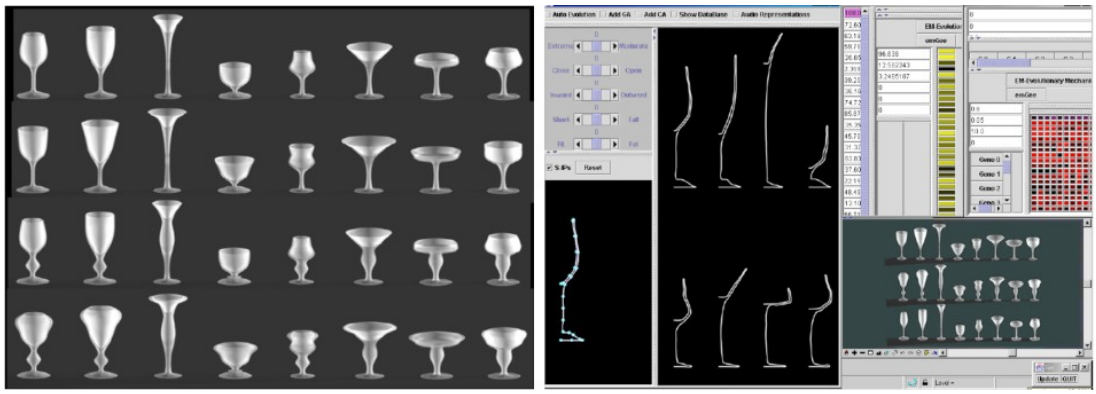


Figure 10. Population de solutions et interface

Shape Grammar for Product Design (2004)

Dans ce projet Lee et Tang (Lee & Tang, 2004) mettent en œuvre un dispositif basé sur une grammaire de forme pour conduire une exploration évolutionnaire et interactive. Chaque solution est évaluée à la fois à l'aide d'une fonction automatique et à travers l'intervention subjective du concepteur qui peut privilégier des espèces. Les auteurs mettent en exergue les limites d'une évaluation automatique, qui d'une part ne permet pas la prise en compte des facteurs esthétiques et qui d'autre part n'intègre pas l'ensemble des contraintes fonctionnelles et techniques que doit satisfaire l'objet conçu. La grammaire de forme utilisée dans ce projet est qualifiée de « basique », et les auteurs cherchent maintenant à compléter leur modèle initiale avec des logiques de grammaire basique non déterministe, de grammaire séquentielle, de grammaire additive, de grammaire déterministe et de grammaire non restrictive.

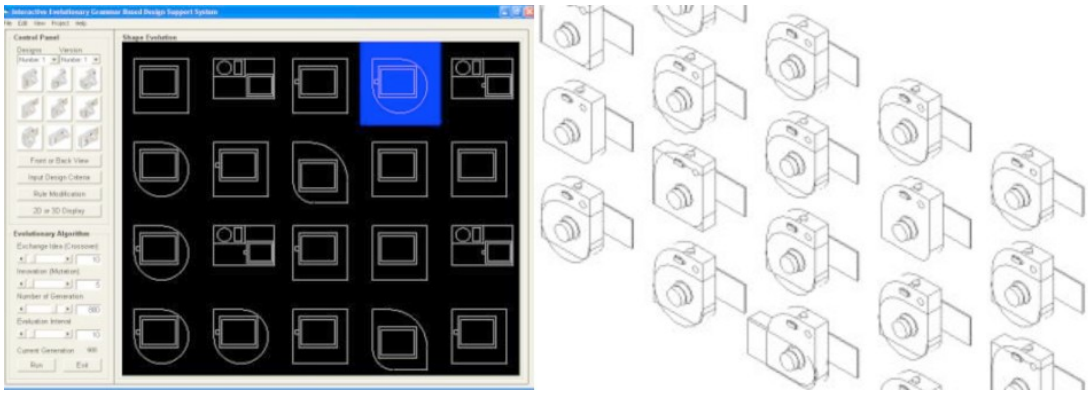


Figure 11. Interface et population de solutions

[13] Flexible Evolutionary Framework

Interactive Creative Simulation System (2009)

Dans ce projet, les auteurs, Lee et Chang, cherchent à intégrer les préférences des consommateurs dans les phases de conception des produits (Ji-Hyun & Ming-Luen, 2010). Ainsi un mécanisme évolutionnaire conduit la construction de populations de téléphones portables. Chaque solution doit répondre à des contraintes techniques et fonctionnelles, puis est soumise à une évaluation subjective. Les utilisateurs expriment leurs sentiments et préférences pour une solution, celle-ci bénéficie alors d'une évaluation positive et sa propagation dans l'algorithme génétique est favorisée. Cette évaluation des préférences est renforcée par la prise en compte non pas d'un unique consommateur mais par l'avis d'un grand nombre. Ainsi c'est le comportement collectif d'un nombre important de consommateurs qui participe à une sélection subjective et facilite des constructions de populations plus importantes. Le système évolutionnaire est couplé à un mécanisme d'intelligence collective.

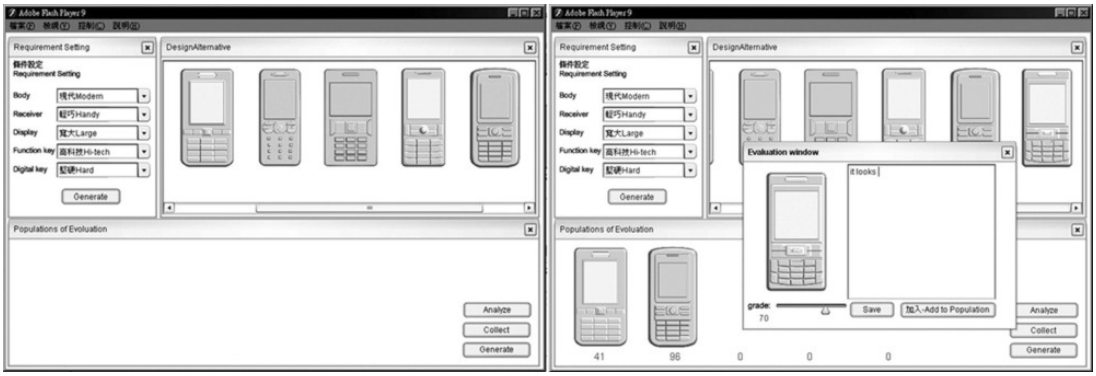


Figure 12. Interface du logiciel

3.1.4.3 MUSIQUE ÉVOLUTIONNAIRE

L'originalité de la création musicale assistée par des algorithmes évolutionnaires est principalement de combiner une évaluation subjective avec des évaluations objectives. Ce qui est riche d'enseignement pour notre projet, où nous souhaitons utiliser des algorithmes génétiques interactifs (IGA) en parallèle avec des évaluations quantitatives des objets architecturaux produits.

3.1.4.3.1 COMPOSER, CRÉER, OPTIMISER

« More structure and knowledge built into the system means more reasonably structured musical output; less structure and knowledge in the system means more novel, unexpected output, but also more unstructured musical chaff. » (Todd & Werner, 1999)

La composition musicale assistée par ordinateur navigue depuis 30 ans entre le désir de produire de la nouveauté et celui de s'appuyer sur des structures existantes reconnues, sans toutefois trouver de compromis réellement satisfaisant. On distingue : - La composition structurée à base de règles plus ou moins explicitées (procédurales ou stochastiques) - La composition libre (mais non exclusive d'utilisation de règles, implicites) - Le couplage des deux.

Les méthodes récentes dévient l'utilisation native de méta-heuristiques d'optimisation pour :

- Composer par mimétisme, c'est-à-dire faire du neuf à partir de l'ancien (à la manière de...), ce qui revient à apprendre un style musical et à le reproduire avec des variations suffisamment judicieuses pour qu'on ait l'impression de la nouveauté.

- Créer des sons ou des rythmes synthétiques par approximation de sons ou rythmes existants (on exploite la

richesse des techniques de production sonore de certains synthétiseurs pour approximer des sons donnés).

- Créer des accompagnements automatiques (arrangements intelligents) en fonction du contenu musical proposé en entrée (en direct ou en différé) (Chou, 2009).

- Chercher des techniques de composition par fusion de motifs (sonores, rythmiques, stylistiques...).

- Inventer des techniques de composition « libre » à base de mutations aléatoires ou de règles appliquées à un morceau donné (grande potentialité d'opérateurs).

3.1.4.3.2 QUELQUES PARTICULARITÉS DANS L'UTILISATION DES AG

L'utilisation récente des AG en musique convoque des processus d'optimisation et des méthodes de création . On navigue ainsi entre la définition de fonctions d'évaluation objectives (mesurables) et subjectives (Gartland-Jones, 2002). L'utilisateur choisit librement une ou plusieurs solutions, sans forcément les noter, en fonction de ses goûts, de son humeur du moment, de ses antécédents psychoaffectifs et culturels.

Faire intervenir l'utilisateur dans un processus de sélection suppose lui faire écouter des échantillons produits, ce qui impose d'en limiter le nombre et ne simplifie pas la dynamique d'évolution de l'algorithme génétique. Les recherches actuelles se focalisent sur des explorations larges (grâce aux opérateurs de mutation et de croisement), mais ne proposent d'écouter que certaines solutions de la population, ce qui pose des problèmes de sélection. De nombreux travaux ont essayé, avec un succès relatif, de quantifier les qualités esthétiques d'un fragment musical (avec ou sans phase d'apprentissage (Klinger & Rudolph, 2005), (Ozcan & Erçal, 2008) , et de s'appuyer sur des bases de données conséquentes) afin de pouvoir utiliser la pleine puissance des AG sans les limiter par la lenteur et la fatigabilité du processus d'interaction utilisateur / processus.

De l'influence des opérateurs de variation

Goldberg, un personnage important dans le développement des AG et de leurs applications, montre que les deux principaux opérateurs de mutation et de recombinaison, en collaboration avec la sélection, reflètent étroitement la manière dont l'innovation humaine a lieu.

Pour illustrer ce propos, on trouve dans (Brown, 2004) une bonne comparaison des types de mutation opérables, à partir de leurs effets produits : mutations aléatoires, mutations musicales aléatoires[14], mutations aléatoires combinées[15], mutations fondées sur des règles[16], mutations fondées sur des règles non modifiées[17], mutations fondées sur des règles quelconques[18], enfin les mutations musicales à base de règles, entre autres mélodiques[19].

Ainsi, l'étude montre que les mutations évolutives, en particulier des changements aléatoires, tendent à

[14] Fondées sur des règles, des processus, conçus pour ajouter de la stabilité aux mélodies

[15] Des mutations à la fois évolutives et musicales sont combinées et appliquées à une population au départ aléatoire. Les résultats sont plus diatoniques et organisés que les mélodies de départ

[16] La qualité musicale, en tenant compte du style de cible désirée, est tout à fait acceptable mais très conservatrice. Les morceaux produits sont parfois convaincants, mais rarement novateurs

[17] Les mélodies de ce processus ont été plus systématiquement cohérentes qu'à l'étape précédente, mais les résultats n'étaient pas plus novateurs

[18] Les résultats montrent que ces mutations procurent parfois un certain intérêt pour les mélodies, mais souvent produisent un effet désagréable

[19] Forme globale fidèle à la nature de l'original, plus grande variété que dans le groupe non traité et des bouffées occasionnelles de nouveauté, particulièrement sur des motifs rythmiques. Les mélodies de ce groupe sont les plus agréables

réduire la cohérence de la forme musicale avec un gain minime dans la nouveauté.

De manière, le hasard seul ne suffit pas à créer du nouveau, de l'imprévu porteur de sens. Il est absolument nécessaire de le guider, et pour cela injecter des bribes d'intelligence créatrice sous une forme ou une autre. Autrement dit : la morphogenèse n'est pas une processus aléatoire aveugle.

Des recherches futures pourraient également dépasser la limitation souvent due à un encodage linéaire des notes de musique au sein des génomes, pour parvenir à une évolution non-linéaire, de second ordre, peut-être plus subtil et plus complexe.

Une dernière tendance dans les développements consiste à définir le processus de création musicale comme un système complexe, dont les parties ainsi que l'utilisateur sont en interaction. L'émergence de la nouveauté, propriété remarquable de ces systèmes, et censée surpasser les possibilités actuelles des algorithmes évolutionnaires, tout en pouvant les intégrer en tant que composants secondaires (Eldridge, 2005), .

3.1.5 LIMITES ET PERSPECTIVES TECHNIQUES

Nous avons montré dans l'état de l'art précédent la part importante prise par les algorithmes génétiques interactifs dans l'évaluation de composantes esthétiques et plastiques qui restent pour parties subjectives et difficiles à modéliser. Nous revenons de manière globale sur les limites de ces dispositifs. L'interaction humaine impose d'une part de travailler sur des populations dont le nombre de phénotypes soumis au concepteur reste faible. La taille des populations ainsi que le nombre de générations parcourues pénalisent le processus évolutionnaire qui trouve naturellement sa performance lors d'exploration multiple et en grand nombre. Les temps d'interprétation et de prise de connaissance de la part du concepteur ralentissent le processus, et l'effet de lassitude contribuent également à limiter le nombre d'itérations. D'autre part les IGA sont généralement associés à des mécanismes de croisement monoparental. La diversité des solutions produites est alors limitée. Finalement, ce mode d'interaction, en imposant un dispositif interactif en temps réel, implique généralement de faibles tailles et complexités du génome. Nous avons vu que certains projets tentent de contourner cette difficulté en convoquant dans l'interaction un nombre suffisant d'utilisateurs, augmentant ainsi l'espace des solutions parcourues.

D'autres ont cherché à accélérer le processus en complétant l'interaction humaine par une automatisation. Des tentatives d'évaluation automatique des critères esthétiques ont ainsi été conduites. Des règles d'harmonie, des couleurs, des sons ou des compositions graphiques, comme une structuration par tiers de l'image, la prise en compte du sens de lecteur dans la composition, la maîtrise des contrastes et des principes renvoyant à la notion de « *bonnes formes* » proposés par le mouvement *Gestalt* sur la psychologie de forme, ont été intégrés dans des fonctions calculables. La génération des solutions est ainsi accélérée par cette automatisation de l'appréciation. Mais il reste extrêmement difficile d'inclure complètement la dimension subjective, portant en elle une part de connaissance historique implicite ainsi qu'une dimension sensible propre à chacun. La modélisation de cette expérience sensible restant pour le moment à l'état embryonnaire.

Les questions de la compréhension du processus et des effets de l'interaction du concepteur sont abordées de manière implicite dans les projets identifiés. Même si les dispositifs portent en eux une logique stochastique, et qu'ils sont censés générer de la nouveauté notamment par la surprise, le concepteur doit être capable d'évaluer les implications de ses choix et sélections. Deux modalités sont classiquement proposées. C'est d'une part la possibilité de contrôler le taux de mutation ou les degrés de brassage de la population, un taux de mutation important induisant de la variété. C'est d'autre part une approche par « *sélection cumulative* » ou un croisement successif des gènes à travers leurs hiérarchisations préalables. Ces deux fonctions algorithmiques sont complétées par une approche ergonomique de l'interface des logiciels. Nous retrouvons alors cinq notions principales, intégrées de manière hétérogène dans les projets identifiés. La représentation de la filiation phylogénétique ou généalogique des individus est présente par exemple dans le projet *GenoType*. Certains projets intègrent les fonctions de construction et définition de l'individu initiale,

d'autres imposent des principes établis. Les modalités de sélection des individus, de combinaison et d'historique sont également très variables en fonction du degré de maturité et des objectifs des outils. La représentation de la correspondance génotypique n'est pas systématiquement proposée. Enfin certains dispositifs se développent dans une perspective d'implication corporelle, avec par exemple des modalités d'interaction tactile ou tangible.

Enfin, il semble que les approches basées sur une dynamique de l'évolution, c'est-à-dire les dispositifs capables de faire évoluer la composition même du génome (Dawkins parle de « *d'évolution de l'évolutivité* ») s'avèrent particulièrement performants en termes de variété et de diversité des solutions.

3.1.6 VERS UN HASARD ALGORITHMIQUE OPÉRATIONNEL

De manière générale, les travaux qui portent sur l'art évolutionnaire impliquent deux réflexions complémentaires. D'une part, la question de la créativité artificielle est posée, et d'autre part la place de l'auteur est redéfinie.

Il ne nous revient pas ici de statuer sur l'existence d'une créativité artificielle, c'est-à-dire sur le fait qu'une machine puisse faire preuve de créativité malgré son caractère mécanique et artificiel, malgré son absence de vie. La question de savoir si la créativité est un phénomène réservé au monde du vivant dépasse notre propos. Mais il reste que les expériences conduites en matière d'intelligence artificielle et de créativité évolutionnaire contribuent à la compréhension des mécanismes humains de la créativité et portent un regard sur l'émergence de la nouveauté dont les composantes sont transposées à la mécanique humaine par les cogniticiens.

La notion d'auteur, ensuite, connaît une transformation qui ici s'illustre par deux composantes principales : L'implication et la participation des utilisateurs ou des visiteurs et la mise en œuvre du « *hasard contrôlé* » comme modalité de création.

Certains des projets identifiés présentent un cadre borné et cherchent à faciliter ou accélérer l'exploration d'un espace de solutions dont la définition est établie au préalable par les concepteurs de l'outil. D'autres expérimentations proposent une structure ou un environnement logiciel facilitant la mise en œuvre d'une approche évolutionnaire et dont le concepteur est libre de l'appliquer à son propre objet de conception. Cependant, à chaque fois, l'auteur accepte une part d'effacement au profit d'une émergence qui lui échappe, interactivité et intelligence collective d'un côté, autonomie algorithmique et « *hasard opérationnel* » de l'autre.

Nous avons identifié dans les mouvements artistiques du début et milieu du XXe siècle, une propension à l'introduction de l'imprévisible et de l'incontrôlé dans le processus de création. Cette revendication d'une œuvre ouvertement aléatoire a longtemps ébranlé la valeur accordée au savoir-faire et au génie artistique. Il nous faut préciser ici la distinction entre d'une part, un « *hasard expressionniste* », la tache accidentelle[20] dont l'artiste tire parti et qui implique l'interprétation de cette forme imprévue par un regard qui lui donne forme, et d'autre part le hasard comme principe de création, qui correspond à la mise au point de techniques aléatoires. Un hasard méthodique, qui implique une mise à distance de l'artiste (Saurisse, 2007). Celui-ci revendique une distanciation par rapport à son œuvre, une autonomisation de l'œuvre elle-même. Ces deux catégories de hasard sont reprises par Monod qui parle d'une « *incertitude essentielle* », c'est le hasard subi, et d'une « *incertitude opérationnelle* », c'est le hasard provoqué (Rolland, 2010). C'est bien cette opérationnalité du hasard qui est convoquée dans les dispositifs stochastiques et évolutionnaires. Celui-ci n'est plus un hasard « mécanique », comme dans les années 60, mais plutôt « algorithmique », et il reste

[20] Cette pratique artistique est explicitement formulée par de nombreux artistes, Nous en donnons deux exemples. Alexander Cozens (1717-1786) publie en 1785 une nouvelle méthode dans le dessin de compositions de paysages (Jormakka, 2007). Francis Bacon parle de « sorte de diagramme » pour qualifier l'ensemble de ces lignes, traits et taches accidentels qui ont la fonction de suggérer, d'introduire des possibilités de faits que le peintre transformera en faits (Deleuze, 2002) (Batt, 2005).

consciemment convoqué par l'artiste dans le processus de création.

3.1.7 CONCLUSION

Nous avons caractérisé l'art évolutionnaire, en le repositionnant dans l'histoire de l'art et en identifiant les pratiques et expérimentations plus récentes. Nous sommes revenues sur les limites et prolongements des techniques d'algorithmes génétiques interactifs (IGA) et nous avons identifié la difficile modélisation de l'expérience sensible. Finalement nous avons précisé la notion du « *hasard contrôlé* » en tant que modalité de création induisant une requalification de la notion d'auteur. Nous nous trouvons alors dans une situation de « *métacréation* », qui transpose le rôle du concepteur au niveau de la définition des conditions d'émergence de l'œuvre plutôt que de l'œuvre elle-même.

Il nous faut finalement remarquer la variété des disciplines et la variété des supports qui mobilisent des logiques évolutionnaires et noter la relative maturité des dispositifs qui trouvent des prolongements de plus en plus fréquents dans l'exploitation et qui quitte la seule communauté scientifique ou artistique.

3.1.8 BIBLIOGRAPHIE

Aziosmanoff, F. (2010). *Living Art : L'art numérique.* CNRS.

Batt, N. (2005). L'expérience diagrammatique : un nouveau régime de pensée. In *Théorie, littérature, enseignement, N° 22 : Penser par le diagramme : De Gilles Deleuze à Gilles Châtelet.* PU Vincennes.

Bergen, S., & Ross, B. J. (2010). Evolutionary Art Using Summed Multi-Objective Ranks. In T. M. R. Riolo, E. Vladislavleva (Ed.), *Genetic Programming Theory and Practice VIII* (pp. 227-244).

Brecht, G. (2002). *L'imagerie du hasard.* Presses du Réel.

Bret, M. (2007). *Création Artificielle*. Paper presented at the La convivialité des interfaces à vocation ludique et/ou pédagogique.

Bret, M. (1986). *Anyflo : Logiciel d'Animation 3D*. Paper presented at the Imaginaire Numérique.

Brown, A. R. (2004). *An aesthetic comparison of rule-based and genetic algorithms for generating melodies*. Paper presented at the Organised Sound 9(2).

Frowd, C. D., Hancock, P. J. B., & Carson, D. (2004). An experiment about genetic typography. *ACM Trans. Appl. Percept*, *1*(1), 19-39.

Chou, Y.-C. (2009). *Style Music Accompaniment Using a Variable-length Genetic Algorithm with Chord Progression.*

Deleuze, G. (2002). *Francis Bacon : Logique de la sensation.* Seuil.

Duchamp, M. (1994). *Duchamp du signe.* Flammarion.

Eldridge, A. (2005). *Cyborg dancing: generative systems for man machine musical improvisation*. Paper presented at the Proceedings of Third Iteration, Melbourne, Australia.

Gartland-Jones, A. (2002). *Can a genetic algorithm think like a composer ?* Paper presented at the Generative Art, Milan.

Husbands, P., Copley, P., Eldridge, A., & Mandelis, J. (2007). An Introduction to Evolutionary Computing for Musicians. In *Evolutionary Computer Music.* Springer London.

Ji-Hyun, L., & Ming-Luen, C. (2010). Stimulating designers' creativity based on a creative evolutionary system and collective intelligence in product design. *International Journal of Industrial Ergonomics*, *40*(3), 295 - 305.

Jormakka, K. (2007). *Basics La recherche de la forme.* Birkhäuser Basel.

Klinger, R., & Rudolph, G. (2005). *Evolutionary Composition of Music with Learned Melody Evaluation*. Paper presented at the Computational Intelligence.

Lee, H. C., & Tang, M. X. (2004). *Evolutionary Shape Grammars for Product Design*. Paper presented at the Generative Art, Milan.

Luga, H. Expérimentations virtuelles: Vie artificielle pour la génération de formes et de comportement. *Actes de JIM 2009 Journées d'informatique musicales - JIM 2009*, pp93-103.

MacGregor, B. (2002). *Cybernetic serendipityrevisited*. Paper presented at the C&C '02 Proceedings of the 4th conference on Creativity & cognition, New York.

Matthew, L., & Phd, C. (2000). *Aesthetic Evolutionary Design with Data Flow Networks in Proc. Generative Art*. Paper presented at the Generative Art.

Ozcan, E., & Erçal, T. (2008). A Genetic Algorithm for Generating Improvised Music

Artificial Evolution. In N. Monmarché, E.-G. Talbi, P. Collet, M. Schoenauer, & E. Lutton (Eds.), *4926* (pp. 266-277). Yeditepe University Department of Computer Engineering 34755 Kadıkoy/Istanbul Turkey: Springer Berlin / Heidelberg.

Paul, C. (2004). *L'Art numérique.* Thames & Hudson.

Paul, C. (2008). *Digital Art (World of Art).* Thames & Hudson.

Rennard, J.-P. (2002). *Vie artificielle. Où la biologie rencontre l'informatique.* Vuibert.

Rolland, E. (2010). Hasard créateur de hasard dans le champ de l'art. *Sans Papier*.

Romero, J., & Machado, P. (2007). *The Art of Artificial Evolution: A Handbook on Evolutionary Art and Music (Natural Computing Series).* Springer.

Saurisse, P. (2007). *La mécanique de l'imprévisible : Art et hasard autour de 1960.* L'Harmattan.

Schmitz, M. (2004). *GenoTyp, A, experiment about genetic typography*. Paper presented at the Generative Art, Milan.

Sims, K. (1994a). *Evolving 3D Morphology and Behavior by Competition*. Paper presented at the Artificial Live.

Sims, K. (1994b). *Evolving Virtual Creatures*. Paper presented at the SIGGRAPH.

Todd, P. M., & Werner, G. M. (1999). Frankensteinian Methods for Evolutionary Music Composition. In *Musical Networks: Parallel distributed perception and performance.* MIT Press.

Towsey, M. W., Brown, A. R., Wright, S. K., & Diederich, J. (2001). Towards melodic extension using genetic algorithms. *Educational Technology & Society*, *4*(2), 54-65.

3.2 LES ENVIRONNEMENTS LOGICIELS ADAPTÉS À UNE ÉCOCONCEPTION GÉNÉRATIVE

Auteur :
Philippe Marin - MAP-ARIA/MAP-CRAI

3.2.1 OBJECTIFS

Ce document présente un état de l'art des environnements logiciels utilisés dans le champ de l'architecture dans une logique évolutionnaire. Il porte un double objectif de caractérisation des solutions logicielles adaptées à une approche d'éco-conception générative et de définition d'une stratégie de choix d'environnements de développement pour les équipes impliquées dans le projet.

Il compose la première partie de l'état de l'art des outils évolutionnaires précédemment développés dans les champs de création au sens large , notamment dans les disciplines de l'art visuel, de la vidéo, du design et de la musique.

L'état de l'art est construit par l'analyse de cinq expérimentations caractéristiques. Chacune d'elle est considérée à travers quatre critères qui portent sur : la caractérisation de l'environnement de développement, le type d'interaction homme-machine, la mesure de la richesse du dialogue homme-machine, le type de données en entrée et en sortie. Les différents projets sont regroupés en deux catégories permettant de mettre en évidence deux stratégies d'intégration des moteurs logiciels : l'intégration des moteurs dans un environnement unique et la création de passerelles entre des environnements logiciels indépendants.

Dans une troisième partie, les trois solutions archétypales identifiées sont comparées et évaluées individuellement.

3.2.2 ÉTAT DE L'ART DES ENVIRONNEMENTS LOGICIELS

3.2.2.1 ARCHITECTURE LOGICIELLE

Nous rappelons dans un premier temps la structuration d'un environnement évolutionnaire composé principalement de trois moteurs spécifiques interconnectés : le moteur d'évaluation, le moteur morphogénétique, le moteur génératif. C'est l'interaction de ces trois composantes qui constitue le mécanisme évolutionnaire. Si la description détaillée de leur fonctionnement est réalisée par ailleurs, nous en donnons une définition succincte.

Le moteur d'évaluation : il permet d'évaluer chacun des individus de la population de chacune des générations. Cette évaluation peut être multiple, dans notre cas et dans une perspective d'éco-génération, ce sont principalement des critères environnementaux qui guideront l'évolution. Les performances énergétiques de chaque analogon pourront alors être calculées par un modèle énergétique, dont la définition reste ouverte. Des critères subjectifs, notamment associés à l'interaction du concepteur, permettant de privilégier une dimension plastique du phénotype, pourraient venir compléter ce mécanisme de sélection.

Le moteur morphogénétique : il permet l'exploration de l'espace des solutions à travers la transformation ou la déformation des individus. Les principes morphogénétiques applicables à notre projet restent en étude. Le moteur peut être appliqué au génotype ou au phénotype. Les transcriptions croisées entre le phénotype et le génotype sont une des caractéristiques d'un principe évolutionnaire, ainsi la contrainte de traduction est prégnante.

Le moteur génératif : Il correspond au mécanisme évolutionnaire, l'état de l'art des méthodes informatiques évolutionnaires est produit dans la tâche 2.1. Ce moteur assure la construction des générations successives à l'aide de mécanismes de croisement et mutation des individus.

3.2.2.2 DEUX STRATÉGIES D'IMPLÉMENTATION DES LOGICIELS

Il semble important de rappeler dans un premier temps que les expérimentations pionnières en matière de conception évolutionnaire dans le champ de l'architecture reviennent aux auteurs tels que, Frazer, Gero, Coates et Soddu. Frazer (Frazer, 1995). (Frazer, 2002) a conduit des travaux sur les mécanismes de croissance des formes architecturales à travers la mise en œuvre de différentes techniques génératives associées aux notions de vie artificielle. Gero a porté un regard cognitif sur les mécanismes évolutionnaires avec pour objectif de modéliser les processus créatifs, il s'est notamment intéressé à la représentation de la connaissance, à l'identification de la nouveauté ainsi qu'à la transformation artificielle de l'espace des solutions (Gero & Maher, 1991) (Assoc, 1993). Coates a exploré la mise en œuvre de L-systems et grammaire de formes dans la perspective de croissance morphologique associée à des critères de performances comme la lumière, le vent ou les propriétés structurelles (Coates, 1996) (Coates, 2010) . Soddu a expérimenté les mécanismes génératifs en tant que dispositifs capables de générer une forme harmonieuse répondant aux critères esthétiques académiques. Il a notamment marqué la riche distinction entre la conception de l'idée et la conception du processus de génération (Soddu, 1998) (Soddu, 2004).

Dans la perspective de prolonger ce premier état des lieux des acteurs caractéristiques et sur la base des définitions précédentes, nous nous intéressons maintenant aux projets récents conduits dans le champ de l'architecture. Nous concentrons notre point de vue sur les environnements logiciels utilisés et nous identifions deux grandes stratégies d'implémentation de ces outils. La première vise l'intégration des trois moteurs dans un environnement unique, la seconde s'attache à construire des passerelles entre des environnements logiciels indépendants.

Chaque projet est référencé et décrit globalement, puis analysé selon quatre critères. L'environnement logiciel précise les langages informatiques utilisés, les types de données en entrée et en sortie, définissent les modalités d'information du système et de prise de connaissance, le type d'interaction homme-machine précise les fonctionnalités d'interaction, finalement la mesure de la richesse du dialogue homme-machine évalue l'interactivité selon trois échelons : riche, moyen, pauvre.

3.2.2.2.1 STRATÉGIE 1 : INTÉGRATION DES MOTEURS

Genr8

Description :

Genr8 est un générateur de surface qui a pour objectif de susciter et stimuler la créativité de l'utilisateur (Hemberg, 2001) (Hemberg & O'Reilly, 2004) . Genr8 a été développé en 2001 au sein de l'équipe Emergent Design Group du MIT et de l'Architectural Association de Londres. L'outil utilise un algorithme de type Hemberg Extented Map L-system (HEMLS) pour faire évoluer et croître une surface dans un espace à 3 dimensions. Ce sont des attracteurs disposés dans la scène qui permettent d'attirer ou repousser les primitives géométriques initialement fournies par l'utilisateur.

Nous rappelons l'objectif initial de stimulation créative de l'outil. Différentes mises en application du logiciel ont démontré la variété des modes d'utilisation et d'interprétation possibles malgré une abstraction importante des modalités d'instanciations.

Environnement de développement :

L'outil Genr8 a été développé en Mel, il fonctionne comme plug-in de Maya.

Type de données en entrée et sortie :

L'utilisateur définit une surface initiale, il positionne des attracteurs polarisés en précisant leur intensité puis lance le processus de génération. Les paramètres de l'algorithme sont instanciés à travers une interface qui prend la forme de boîtes de saisie et permet notamment de paramétrer l'algorithme génétique, les règles associées à la grammaire de forme et la fonction d'évaluation. En sortie, le logiciel propose un modèle géométrique éditable dont les caractéristiques topologiques dépendent du modèle initial.

Type d'interaction homme-machine :

Il y a peu ou pas d'interaction homme-machine une fois le processus lancé. L'accès à l'historique des solutions et l'édition de chacun de ces phénotypes est cependant possible.

Mesure de la richesse du dialogue homme-machine :

Le dialogue homme-machine est faible.

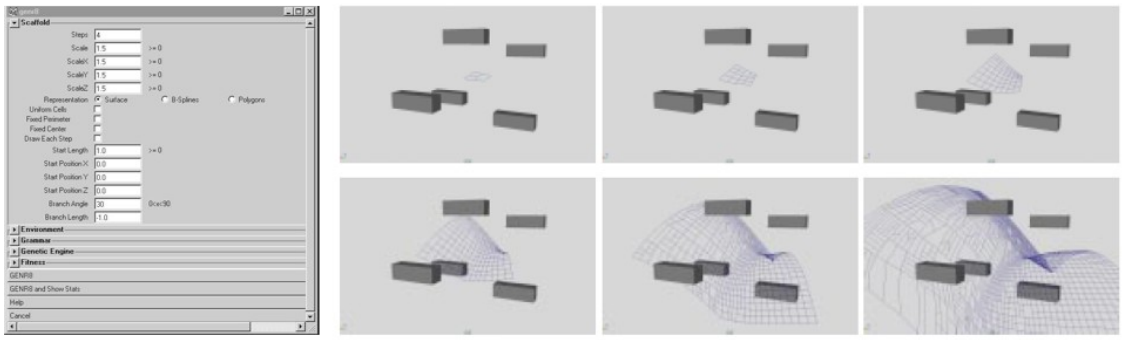


Figure 13. Interface et vue des résultats dans la Scène 3D

Genomics

Description :

Genomics a été développé en 2008 par Keith Besserud (Besserud & Cotten, 2008). Il porte sur l'optimisation de l'enveloppe d'un édifice pour maximiser la captation solaire. Ici l'édifice prend la forme d'une tour, il est composé de six niveaux définis par des ellipses. C'est la modification des paramètres de construction des ellipses qui permet l'exploration morphologique : largeur, longueur et orientation de la normale. Les ellipses extrêmes restent inchangées. Des contraintes, du type surface habitable minimale et surface d'enveloppe maximale, sont intégrées. Elles rendent possible l'utilisation de fonctions de pénalité et l'arbitrage entre les solutions.

Environnement de développement :

Les moteurs d'évaluation, de génération et de morphogenèse ont été implémenté dans Ecotect®. Initialement développé par le groupe de recherche Square One, Ecotect® est aujourd'hui un logiciel de la gamme Autodesk®. Ecotect est un logiciel de simulation et d'évaluation énergétique : ombre et réflexion, éclairement, irradiation solaire, performances thermiques, performances acoustiques. Les rapports produits basés sur les normes LEED® et Energy Star®.

Type de données en entrée et sortie :

L'utilisateur fournit au logiciel une description sommaire de l'édifice en positionnant l'altitude de chaque niveau. Le paramétrage de l'algorithme génétique est possible à travers une interface simplifiée : nombre de générations, nombre d'individus dans la population, taux de croisement et taux de mutation. En sortie, le

logiciel propose le modèle géométrique ainsi que le rapport d'évaluation de l'individu sélectionné.

Type d'interaction homme-machine :

L'interaction homme-machine repose sur les spécifications initiales, il n'y a pas d'interaction pendant le processus de génération et aucune représentation phylogénétique.

Mesure de la richesse du dialogue homme-machine :

Le dialogue homme-machine est faible et l'outil est extrêmement contraint par une hypothèse de conception. Le moteur morphogénétique, s'il peut convenir ici, reste limité aux principes établis.

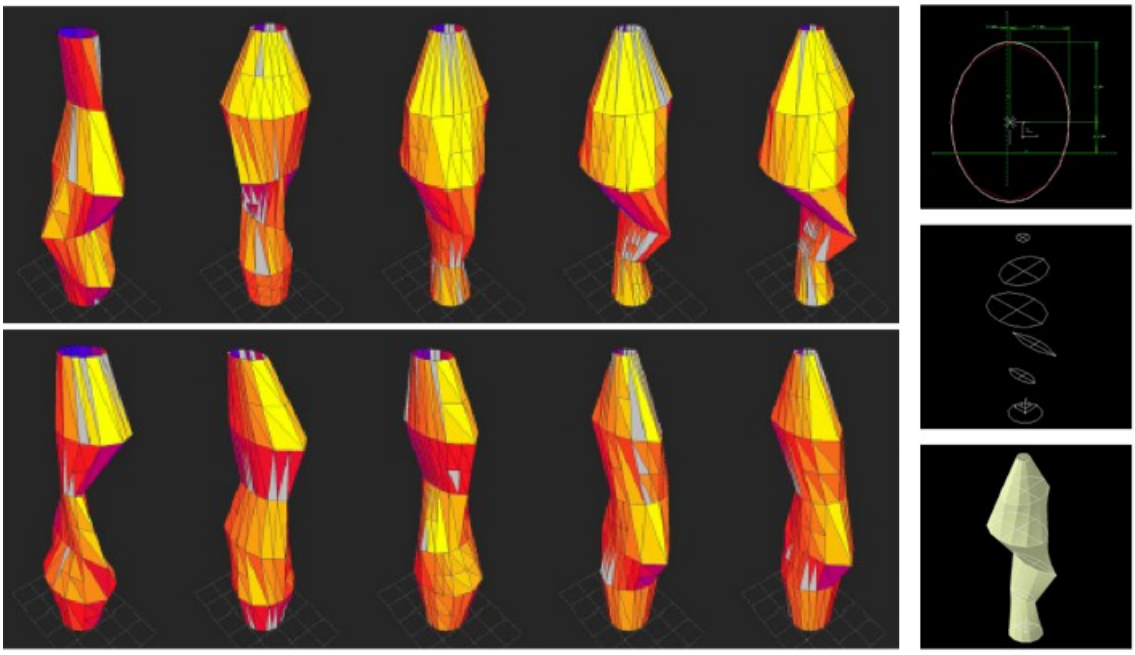


Figure 14. Vue des résultats dans la Scène 3D

RFDS - Responsive Facade Design System

Description :

RFDS a été développé en 2008 par Kawakita (Kawakita, 2008). L'outil permet le positionnement et le dimensionnement d'ouvertures sur une ou plusieurs surfaces verticalement. L'orientation et de la localisation de l'édifice sont précisées, c'est le niveau d'éclairement d'un ou plusieurs points de référence qui permet l'évaluation et la simulation des solutions.

Environnement de développement :

L'outil est développé dans Ecotect®, moteur d'évaluation, de génération et de morphogenèse sont intégrés dans ce même environnement. La simulation et l'évaluation des individus exploitent le moteur du logiciel, les moteurs morphogénétique et génératif sont écrits en LUA, langage de script de Ecotect®.

Type de données en entrée et sortie :

L'utilisateur définit géométriquement les limites de l'enveloppe de l'édifice, constituées de plans verticaux dont le nombre et l'orientation sont libres. Il précise un ou plusieurs points de référence à l'intérieur de l'enveloppe en spécifiant une position en X, Y et Z, puis attribue à chacun d'eux une valeur d'éclairement objectif. Une interface de type boîte de saisie permet de spécifier le type de percements, à base quadrilatère ou circulaire, ainsi que des contraintes de taille et d'espacement maximal et minimal. En sortie, le logiciel

propose un modèle géométrique éditable et exportable avec rapport d'évaluation et représentation de la simulation.

Type d'interaction homme-machine :

L'interaction homme-machine repose sur les spécifications initiales, il n'y a pas d'interaction pendant le processus de génération et aucune représentation phylogénétique.

Mesure de la richesse du dialogue homme-machine :

Le dialogue homme-machine est moyen. L'outil est contraint par l'hypothèse de conception et peu flexible. Seules les spécifications géométriques initiales offre aux concepteurs une liberté formelle.

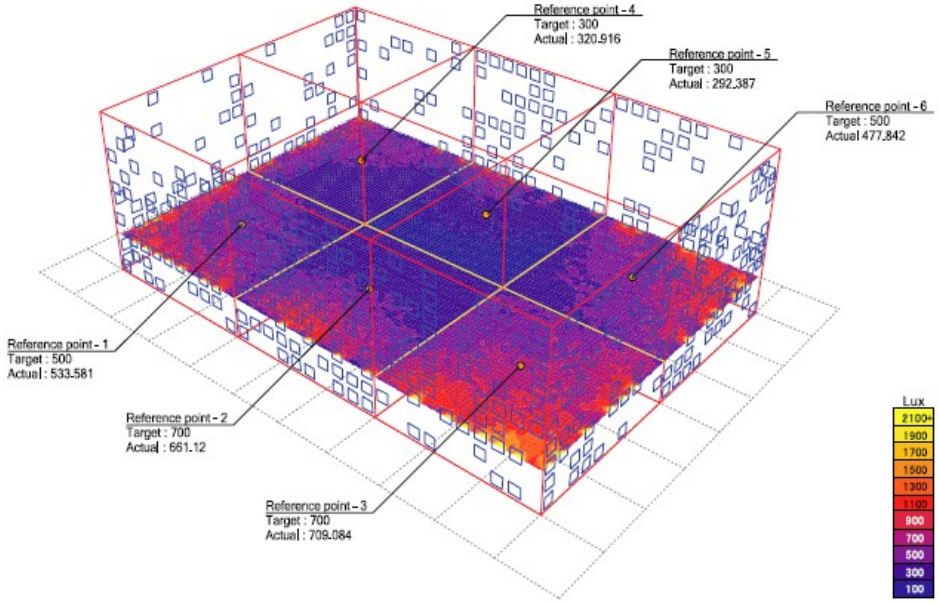


Figure 15. Résultat et simulation

Building Synthesizer

Description :

Building Synthesizer a été développé par Dillenburger en 2009 au sein de l'équipe Kaisersrot de l'ETH de Zürich. L'outil porte sur l'arrangement spatial automatique d'un programme défini sur un site donné. L'outil met en œuvre une stratégie évolutionnaire à travers une population de taille 1. À partir de la description géométrique, topographique et climatique d'un site, l'espace est subdivisé en voxel[21] (contraction de « volumetric pixel »). Un ensemble de points est distribué sur le site, leur arrangement n'est pas nécessairement orthogonal, le graphe dual permet de vérifier les liens d'adjacence, puis la surface est discrétisée. Chaque cellule correspond alors à une unité du programme. Les hauteurs de niveau sont constantes et la subdivision en voxel est répétée verticalement à égale distance. Chaque voxel stocke non seulement ses informations géométriques mais également son niveau de performance. La distribution de ces primitives et leur lissage géométrique permettent la représentation de l'édifice final. Le moteur d'évaluation est intégré au logiciel dans un soucis de performance, d'interaction et d'ergonomie. Chaque cellule est évaluée, chaque qualité est pondérée par un facteur de priorité, et la valeur cumulée des évaluations

[21] Le voxel correspond à un pixel en trois dimensions, son synonyme boxel est également utilisé, il s'inscrit généralement dans des espaces matriciels.

constitue la note globale. Le modèle d'évaluation est constitué de 10 couples paramètre-qualité associés à des normes : information-perméabilité, température-isolation, lumière-translucidité, vue-transparence, son-isolation acoustique, eau-perméabilité, proximité-coût de circulation, poids-stabilité, profondeur-espace, trafic-accessibilité.

Environnement de développement :

L'outil a été développé dans un environnement spécifique de type Cocoa. Ce choix est justifié par un soucis de performance, réactivité, interactivité et ergonomie.

Type de données en entrée et sortie :

L'utilisateur décrit en entrée les caractéristiques topographiques du site, le bâti et les infrastructures existants. Dans un second temps, il précise les caractéristiques fonctionnelles de chaque unité du programme : lien de proximité (matrice d'adjacence), contraintes géométriques (proportions) et physique (illumination, niveau de confort). En sortie, la solution est représentée en trois dimensions et chaque niveau de performance peut être visualisé. L'export géométrique est possible ainsi que l'enregistrement d'un tableau de valeurs.

Type d'interaction homme-machine :

Au cours du processus, l'utilisateur a la possibilité de modifier en temps réel et de manière interactive la pondération de chacun des paramètres d'évaluation.

Mesure de la richesse du dialogue homme-machine :

Le dialogue homme-machine est riche du fait de cette interactivité.

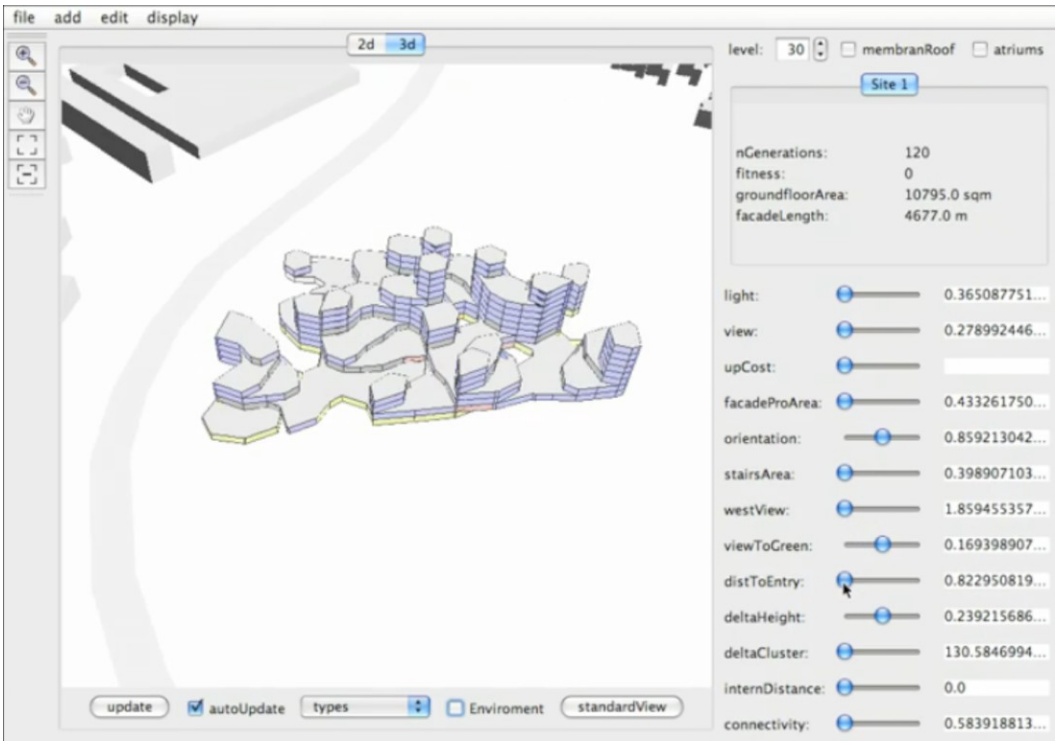


Figure 16. Interface

3.2.2.2.2 STRATÉGIE 2 : CRÉATION DE PASSERELLES ENTRE LES

GS – Generative System

Description :

Generative System est développé depuis 2001 par Caldas dans un premier temps au sein des équipes du MIT (Caldas & Rocha, 2001) (Caldas, 2005) (Caldas, 2005) (Caldas & Norford, 2003). Des prolongements du projet initial sont en cours de publication. L'outil porte sur l'optimisation des ouvertures et de la composition des façades en fonction des performances énergétiques de l'enveloppe. Le système combine un algorithme génétique avec un logiciel de simulation énergétique (DOE2.1). Le principe évolutionnaire utilise l'algorithme de Pareto pour construire et représenter un ensemble de solutions non dominées. Le principe morphogénétique repose sur l'identification d'un vocabulaire architectural identifié. La fonction d'évaluation cherche un compromis entre la maximisation de l'éclairement de la pièce et la minimisation des pertes calorifiques à travers les surfaces vitrées.

Environnement de développement :

L'outil est développé dans un environnement indépendant de type Java et couplé au moteur d'évaluation DOE2.1. DOE (Building Energy Use and Cost Analyse Program) est un programme de simulation des performances énergétiques. Il a été développé par les équipes de Berkeley National Laboratory. Le moteur est disponible, il existe de nombreux logiciels proposant son interfaçage (EnergyPlus, Equest). Nous notons que les équipes de Berkeley National Laboratory travaillent actuellement à un outil d'optimisation des solutions appelé GenOpt[22].

Type de données en entrée et sortie :

La contextualisation et la localisation du projet permettent l'accès aux données climatiques. Ici la représentation schématique initiale n'est pas modifiable par l'utilisateur mais établie par Caldas. Le volume architectural se décompose en deux niveaux, chacun d'eux décomposables en quatre pièces. Les relations d'adjacence par niveau sont fixées. Si les hauteurs des pièces du niveau 0, sont fixées, l'ensemble des autres dimensions sont libres et utilisées comme variables par l'algorithme. L'inclinaison des toitures de chacune des pièces du niveau 1 peut varier entre une position horizontale et une inclinaison à 45°. La taille des ouvertures sur chacune des façades extérieures évolue également.

Type d'interaction homme-machine :

Il y a peu d'interaction homme-machine à l'exception de la géolocalisation du projet. L'outil n'est pas conçu dans une perspective d'expérience utilisateur.

Mesure de la richesse du dialogue homme-machine :

Le dialogue homme-machine est pauvre, la principale caractéristique du dispositif repose sur la représentation du front de Pareto qui facilite la compréhension et la représentation de l'espace des solutions.

[22] Les travaux de l'équipe Simulation Research Group de l'institut Berkeley National Laboratory sont accessibles à l'adresse suivante : http://simulationresearch.lbl.gov/

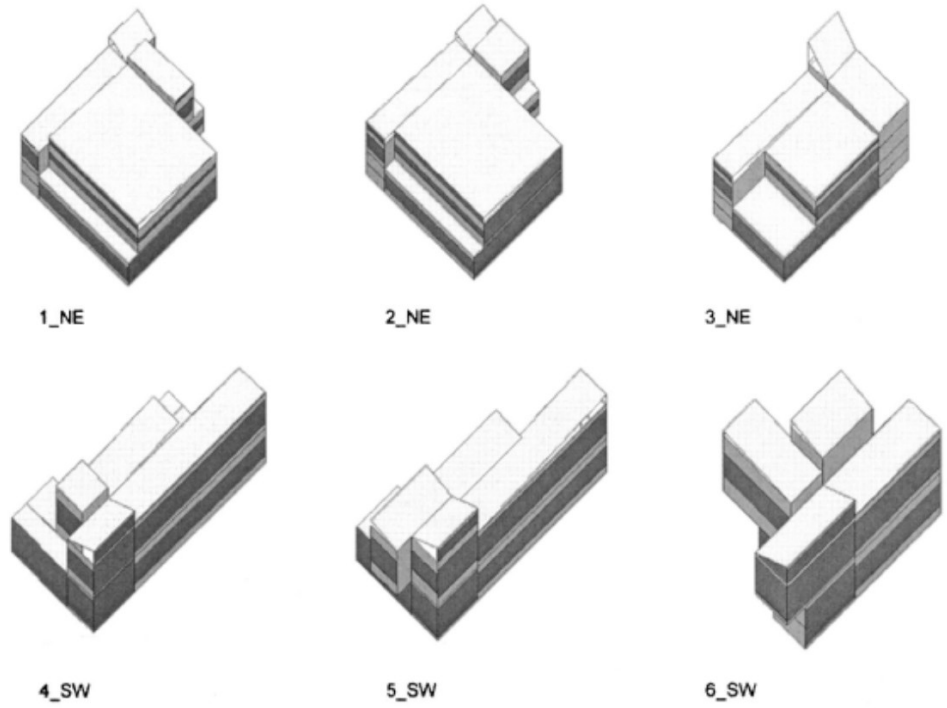


Figure 17. Résultats

ParagenTool : Performance Oriented Design of Large Passive Solar Roofs

Description :

ParagenTool est développé par Mickael Turrin au sein de l'équipe de l'Université de Delf et en partenariat avec l'université du Michigan. Cette expérimentation se base sur le moteur génératif développé par P. von Buelow (Buelow, 2007) (Buelow, 2009). Le projet ParagenTool vise l'optimisation d'une couverture de type ombrière dont les qualités structurelles ainsi que la quantité de lumière filtrée sont évaluées.

Environnement de développement :

La particularité du dispositif repose sur la construction de passerelles multiples entre différents logiciels. La quantité de lumière est évaluée par Ecotect®, les qualités structurelles sont vérifiées par STAAD-Pro®[23], le modèle paramétrique est construit dans Generative Components®, l'évolution est effectuée par un algorithme génétique implémenté dans un service web, l'historique des solutions est stocké dans une base de données SQL.

Type de données en entrée et sortie :

Les données d'entrée correspondent au modèle paramétrique contextualisé et géolocalisé.

Type d'interaction homme-machine :

Le modèle paramétrique de l'ombrière est construit dans Generative Components®, cet environnement autorise une modélisation particulièrement riche, cette dernière doit cependant respecter les contraintes de description imposées par les moteurs d'évaluation STAAD-Pro® et Ecotect®. La construction du modèle impose donc une part d'abstraction importante.

Une interface web permet l'accès à l'historique des solutions et propose des modalités d'interaction, du type re-activation d'une solution antérieure. La base de données stocke la description géométrique des individus,

[23] Simulation par éléments finis

ces derniers peuvent être reconstruits par Generative Components®.

Mesure de la richesse du dialogue homme-machine :

Le dialogue homme-machine est moyen, même si peu d'interactions sont permises pendant le processus, la construction du modèle paramétrique est ouvert et l'accès à une représentation de l'ensemble des générations est intéressant.

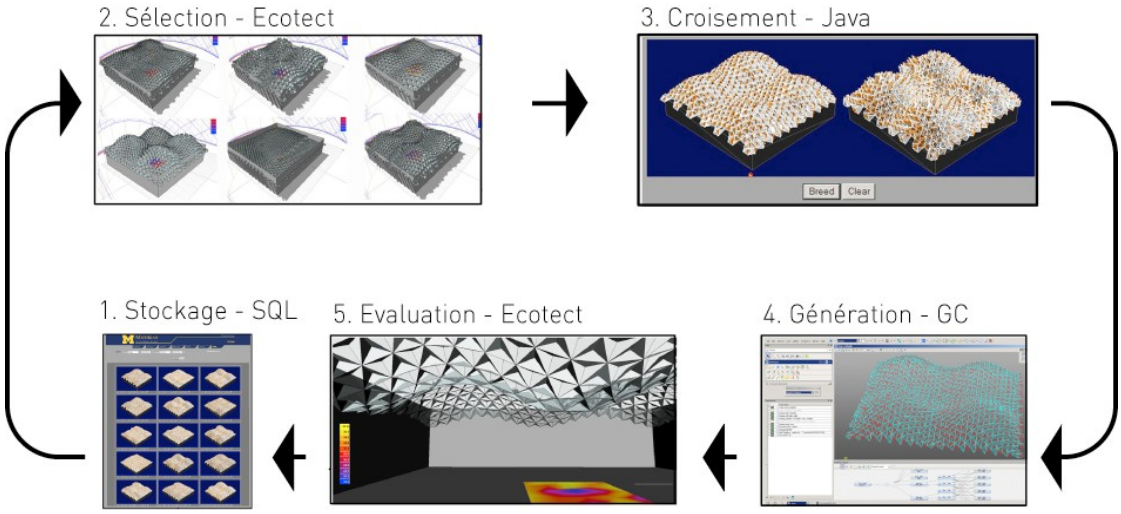


Figure 18. Passerelles entre les différents environnements logiciels.

3.2.3 CARACTÉRISATION DES SOLUTIONS ARCHÉTYPALES

Après avoir décrit ces différentes expérimentations, nous voudrions caractériser les trois solutions archétypales identifiées. Si les deux premières sont associées à une stratégie d'intégration des différents moteurs dans un environnement unique, la troisième passe par la construction de passerelles entre des environnements distincts.

L'analyse se fera à l'aide des critères suivants : d'une part la performance et la facilité d'intégration des moteurs d'évaluation, morphogénétique et génératif, d'autre part le caractère ouvert ou fermé de la solution et enfin l'importance de la communauté d'utilisateurs, la disponibilité des ressources et le niveau d'utilisation au sein des écoles.

3.2.3.1.1 SOLUTION JAVA / COCOA

L'hypothèse d'une solution logicielle basée sur un développement spécifique de type Java ou Cocoa, présente l'avantage de la performance en termes de temps de calcul, elle facilite les modalités d'interaction, elle enrichit le dialogue homme-machine à travers des dispositifs ergonomiques permettant des manipulations directes du concepteur pendant le processus génératif.

Degré d'ouverture de la solution :

Ces solutions sont indépendantes des environnements CAO, elles peuvent être déployées de manière autonome et sur des plateformes multiples (Windows ou Mac).

Importance de la communauté et niveau d'utilisation dans les écoles :

Un développement de type Java, à l'aide du module Processing[24] présente des avantages certains. Nous notons une bonne documentation, une communauté importante, la facilité d'utilisation, des bibliothèques génétiques disponibles ainsi que des bibliothèques 3D intégrant des fonctions d'exportation CAO. (Géridan & Lafargue, 2011) (Reas & Fry, 2007) . Initialement conçu comme support à une activité conceptuelle ou pédagogique, l'utilisation de Processing dans les écoles d'art, de design et d'architecture est certain.

Intégration des moteurs d'évaluation, morphogénétique et génératif :

Cependant deux limites majeures sont identifiées. Un tel environnement impose d'une part le développement intégral d'un moteur énergétique ou la construction de passerelles vers un environnement existant. D'autre part le moteur morphogénétique doit également être intégralement écrit, aucune fonction de déformation géométrique n'est actuellement disponible.

3.2.3.1.2 SOLUTION ECOTECT / LUA

Intégration des moteurs d'évaluation, morphogénétique et génératif :

La solution d'un développement dans l'environnement Ecotect® à l'aide d'une écriture en LUA est envisageable. Le moteur d'évaluation énergétique serait alors directement accessible et l'algorithme génératif pourrait être intégré. Cependant le moteur morphogénétique est quasi inexistant, une réécriture complète des fonctions de déformation géométrique devrait être réalisée. Il faut aussi noter la difficulté de développement d'une interface utilisateur, celle-ci restant nécessairement minimum avec les fonctions LUA disponibles.

Importance de la communauté et niveau d'utilisation dans les écoles :

Ecotect® est logiciel métier particulièrement bien adapté aux opérations de simulation et d'évaluation énergétique du bâtiment.

Degré d'ouverture de la solution :

Le développement serait ici associé à un environnement propriétaire au sein d'un logiciel du marché.

3.2.3.1.3 SOLUTION RHINO3D / GRASSHOPPER / ECOTECT

Intégration des moteurs d'évaluation, morphogénétique et génératif :

La solution consistant à la construction de passerelles entre des environnements logiciels, présente l'avantage de l'exploitation des spécificités de chacun des systèmes, mais au prix de temps de calcul et de faibles interactions directes pendant le processus génératif. Ainsi l'imbrication de Grasshopper et Rhino 3D autorise la construction de modèles paramétriques. La fonction Galapagos de Grasshopper offre dès à présent l'accès à un algorithme génétique. Une passerelle entre Grasshopper et Ecotect® est possible. Elle a été testée à l'aide du plug-in Geco[25]. Un tel dispositif rendrait possible la mise en œuvre d'un modèle paramétrique ouvert, dont la définition pourrait être complétée par les intentions de chaque concepteur, le moteur d'évaluation pourrait être implémenté en VBScript ou couplé à l'environnement Ecotect. Le moteur génératif pourrait dans un premier temps utiliser la fonction Galapagos, pour à terme envisager l'intégration d'un nouveau plug-in Ec-Co-Gen. Enfin l'interfaçage, l'enregistrement de l'historique, la représentation phylogénétique pourraient être réalisés à travers un webservice et une base de données SQL.

Importance de la communauté et niveau d'utilisation dans les écoles :

[24] Une documentation complète de processing est disponible à l'adresse processing.org

[25] Le téléchargement du plug-in et sa documentation son accessible aux adresses suivantes : http://www.grasshopper3d.com/group/geco et http://www.utos.blogspot.com/

L'utilisation de Rhino3D et Grasshopper connaît un fort engouement dans la communauté des architectes, il est largement répandu et inscrit au programme pédagogique de nombreux établissements. Si Rhino3D est un logiciel propriétaire, Grasshopper est distribué gratuitement et les ressources sont nombreuses.

Degré d'ouverture de la solution :

La construction de passerelles entre les différents environnements informatiques offre une complémentarité fonctionnelle au prix d'une complexification du système. Une telle stratégie permettrait alors le développement d'un prototype autorisant la critique des hypothèses.

Les enjeux portent alors sur deux questions principales. D'une part la description du modèle paramétrique et d'autre part la qualification du plug-in Galapagos.

Définition du modèle paramétrique

Le modèle paramétrique est intégré au moteur morphogénétique qui fera l'objet d'une analyse distincte, nous souhaitons cependant rappeler quelques enjeux associés à sa définition. Le modèle paramétrique est composé de trois sous-modèles. D'une part, le modèle volumétrique définit le volume ou la surface, la position et la forme des unités et de l'ensemble. Ses caractéristiques sont étroitement liées au moteur morphogénétique et aux fonctions de déformation, transformation du modèle. D'autre part, le modèle logique décrit la matérialité et les propriétés physiques de l'enveloppe, des espaces ou des milieux. Enfin le modèle d'élémentisation permet un changement d'échelle à travers l'augmentation de la granulométrie. Il nous faut rappeler que nous nous intéressons aux phases de conception initiales et que notre dispositif doit participer à la stimulation d'une pensée créative, l'objet représenté doit alors faire référence à un réel analogue et porter en lui une part d'interprétation importante capable de favoriser une pensée latérale générative en déclenchant des idées dans la pensée du concepteur.

Caractérisation de Galapagos

Le plug-in Galapagos, présent dans Grasshopper depuis la mise à jour 0.8, offre l'accès simple et rapide à un algorithme génétique. La description de son fonctionnement, de son interface, des mécanismes de sélection, des principes de croisement, de coalescence et de mutation dépasse le cadre de cette étude, ils ont été réalisés par ailleurs. Nous revenons simplement sur deux limites principales. D'une part, le moteur Galapagos est un environnement fermé, aucune modification ou enrichissement de son fonctionnement n'est autorisé. D'autre part, l'enrichissement par un dispositif interactif de type IGA n'est pas possible. Ainsi il semble nécessaire d'envisager le développement spécifique d'un plug-in Eco-Co-Gen intégrable à Grasshopper.

3.2.4 CONCLUSION

Finalement, le développement d'un système d'information fondé sur la construction de passerelles entre des environnements spécialisés et des développements de plug-in dédiés au projet conviendrait. Celui-ci serait structuré autour de Rhino3D, Grasshopper (moteur morphogénétique et génératif), ecotect® (moteur d'évaluation) et un webservice autorisant la représentation phylogénétique. Une telle stratégie répondrait aux contraintes de délais de mise en œuvre et au phasage du projet.

3.2.5 BIBLIOGRAPHIE

Besserud, K., & Cotten, J. (2008). *Architectural Genomics*. Paper presented at the ACADIA, Minneapolis, USA.

Buelow, P. v. (2007). *Genetically Engineered Architecture - Design Exploration with Evolutionary Computation.* VDM Verlag Dr. Mueller e.K.

Buelow, P. v. (2009). *A comparison of methods for using genetic algorithms to guide parametric associative design*. Paper presented at the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS), Valencia, Spain.

Caldas, L., & Rocha, J. (2001). *A generative design system applied to Siza school of architecture at Porto*. Paper presented at the Caadria, Sydney.

Caldas, L. G. (2005). *Three-Dimensional Shape Generation of Low-Energy Architectural Solutions using Pareto Genetic Algorithms*. Paper presented at the eCAADe, Lisbon (Portugal).

Caldas, L. G., & Norford, L. K. (2003). Genetic algorithms for optimization of buiding envelopes and the design and control of HVAC Systems. *Journal of solar energy engineering*, *125*, 125.

Coates, P. (1996). *The use of cellular automata to explore bottom up architectonics rules*. Paper presented at the Eurographics UK, London.

Coates, P. (2010). *Programming Architecture.* Routledge.

Coates, P., Broughton, T., & Jackson, H. (1999). Exploring three-dimensional design worlds using Lindenmayer Systems and genetic programming. In *Evolutionary Design by Computers* (pp. 232-341). Morgan Kaufmann.

Dillenburger, B., Braach, M., & Hovestadt, L. (2009). *Building design as individual compromise between qualities and costs : A general approach for automated building permanent cost and quality control*. Paper presented at the CAAD Futures, Montréal, Canada.

Embden Andres, M. V. v., Turrin, M., & Buelow, P. v. (2009). *Structural DNA : Genetic Exploration of Biological Micro Structures for Architectural Applications*. Paper presented at the ACSA Southwest, Albuquerque, New Mexico.

Frazer, J. (1995). *An Evolutionary Architecture: Themes VII.* Architectural Association Publications.

Frazer, J. (2002). *Generative and Evolutionary Techniques for Building Envelope Design*. Paper presented at the Generative Art, Milan, Italy.

Géridan, J.-M., & Lafargue, J.-N. (2011). *Processing : Le code informatique comme outil de création.* Pearson Education.

Gero, J. S., & Maher, M. L. (1991). *Mutation and analogy to support creativity in computer aided design*. Paper presented at the CAAD Futures.

Assoc, L. E. a. (Ed.). (1993). *Modeling Creativity and Knowledge-Based Creative Design.*

Hemberg, M. (2001). *Genr8 - A design Tool for Surface Generation.* MIT.

Hemberg, M., & O'Reilly, U.-M. (2004). *Extending grammatical evolution to evolve digital surfaces with Genr8*. Paper presented at the EuopGP, Coimbra, Portugal.

Hemberg, M., O'Reilly, U.-M., Menges, A., Jonas, K., Gonçalves, M. d. C., & Fuchs, S. R. (2007). Genr8: Architects's experience with an emergent design tool. In *The Art of Artificial Evolution: A Handbook on Evolutionary Art and Music (Natural Computing Series).* Springer.

Hovestadt, L., & Danaher, T. (2009). *Jenseits Des Rasters -- Architektur Und Informationstechnologie/Beyond the Grid -- Architecture and Information Technology: Anwendungen einer digitalen Architektonik / Applications of a Digital Architectonic.* Birkhauser Verlag AG.

Kawakita, G. (2008). *Environmental Optimisation Methods in Sustainable Design Process : In Combination*

with Evolution-Based Digital Technology. Oxford Brookes University.

Laub, J., Bohnacker, H., Grob, B., & Lazzeroni, C. (2011). *Design génératif - Concevoir, programmer, visualiser.* Editions Pyramid.

Reas, C., & Fry, B. (2007). *Processing: A Programming Handbook for Visual Designers and Artists.* The MIT Press.

Soddu, C. (2004). *Argenia, Artifical DNA And Visionary Variations*. Paper presented at the SIGraDi 2004 - [Proceedings of the 8th Iberoamerican Congress of Digital Graphics], Porte Alegre - Brasil.

Soddu, C. (1998). *Argenia, a Natural Generative Design*. Paper presented at the Generative Art, Milan.

Turrin, M., von Buelow, P., Stouffs, R., & Kilian, A. (2010). *Perfomance-Oriented Design of Large Passive Solar Roofs*. Paper presented at the eCAADe, Zurich.

3.3 LES MÉTHODES INFORMATIQUES ÉVOLUTIONNAIRES

Auteur :
Xavier Marsault, MAP-ARIA.

3.3.1 CONTEXTE ET OBJECTIFS

3.3.1.1 RAPPEL

Cet état de l'art des processus informatiques se décompose en trois étapes distinctes et complémentaires : identification des méthodes informatiques évolutionnaires, caractérisation des outils évolutionnaires convoqués dans les champs de la création et état de l'art des méthodes d'évaluation de la créativité . Deux sous-tâches vont permettre d'identifier les caractéristiques des différents processus évolutionnaires et de comprendre leur efficience respective dans la perspective du développement d'un outil d'assistance à la création.

3.3.1.2 MÉTHODE

Cette revue de littérature porte sur l'identification et la caractérisation des méthodes informatiques évolutionnaires . Elle s'appuie assez largement sur les travaux de recherche et les productions scientifiques de quatre experts français reconnus dans les domaines de l'évolution artificielle et de la bio-informatique : Pierre Collet (professeur au Laboratoire des Sciences de l'Image, de l'Informatique et de la Télédétection de l'Université Louis Pasteur à Strasbourg), Marc Schoenauer (directeur de recherches à l'INRIA, co-créateur avec E. Lutton de l'association « Evolutions Artificielles »), Évelyne Lutton (chercheur en bio-inspiration, fractalité, complexité et émergence, directrice de recherches à l'INRIA, co-créatrice du « projet Fractales » [59]) et Guillaume Beslon (professeur au département des sciences computationnelles de l'INSA de Lyon, chercheur au sein de l'équipe Combining du LIRIS, et directeur de l'Institut des Systèmes Complexes de Lyon).

Les premiers algorithmes évolutionnaires ont été utilisés, au départ, comme des heuristiques d'optimisation : l'étude commence donc par une introduction à l'optimisation de problèmes difficiles. Elle présente ensuite les théories de l'évolution naturelle des populations biologiques – principales sources d'inspiration de ces algorithmes historiques – accompagnées d'une brève synthèse des mécanismes génétiques de la biologie permettant de mieux comprendre leur fonctionnement.

L'étude décrit ensuite et en détails les modes opératoires des algorithmes évolutionnaires (dénommés désormais AE). On s'intéresse aux grandes familles : la programmation évolutionnaire (Lawrence Fogel, 1963), les stratégies évolutionnaires (Ingo Rechemberg, 1973), les algorithmes génétiques (John Holland, 1973-1975), la programmation génétique (John Koza, 1992), les algorithmes à estimation de distribution (Mühlenbein et Paaß, 1996) et les algorithmes à évolution différentielle (Price et Storn, 1995). Certaines parties plus techniques sont renvoyées en annexe, et leur lecture est facultative.

La revue se termine par une réflexion sur l'usage des AE dans le champ créatif, en comparant les deux usages principaux des AE : en tant que méta-heuristiques d'optimisation ou en tant que moteurs d'aide à la conception (design). On ouvre des pistes de réflexion à partir de recherches récentes sur l'évolution. On essaie d'identifier les capacités de chaque classe d'AE à supporter un processus créatif, et l'on fournit quelques pistes pour guider le choix des méthodes évolutionnaires pour favoriser la morphogenèse et la créativité.

3.3.2 OPTIMISATION DE PROBLÈMES DIFFICILES

Un problème d'optimisation P consiste à maximiser ou minimiser une fonction objectif f (réelle ou vectorielle) sur un ensemble Ω de solutions candidates.

Contexte

- Approches pour résoudre des pb d'optimisation $P = (\Omega, f)$
  - Ω = Ensemble des combinaisons candidates
    - $\rightsquigarrow$ Espace de recherche
  - $f : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ = Fonction objectif à maximiser (ou minimiser)
- $\rightsquigarrow$ But = chercher $e^* \in \Omega$ tel que $f(e^*)$ soit maximal

De nombreux problèmes d'optimisation ne peuvent être résolus ni de manière exacte (on n'en connaît pas de solution mathématique ou algorithmique), ni de manière optimale (indépendamment de la puissance de calcul qu'on y consacre). Ce sont des problèmes « difficiles », pour lesquels on va concevoir des heuristiques de résolution : méthodes se voulant simples, rapides et adaptées aux problèmes, consistant à approcher les solutions optimales, en n'explorant qu'une faible partie des solutions possibles, de manière opportuniste. Leur capacité d'optimisation avec un minimum d'informations est contrebalancée par le fait qu'elles n'offrent en général aucune garantie quant à l'optimalité des meilleures solutions trouvées, appelées solutions optimisées.

L'allure du paysage de recherche, qui correspond à la répartition des extrema de f parmi l'ensemble des valeurs possibles, s'avère fondamental pour évaluer la difficulté du problème. Il peut exister un seul extremum global, ou plusieurs, ou encore plusieurs extrema locaux proches ou éloignés, répartis uniformément ou pas, denses ou pas (figure 1). On appelle *intensification* toute démarche visant à diriger l'effort de recherche vers les meilleures solutions, et *diversification* toute démarche permettant de découvrir de nouvelles zones contenant éventuellement de meilleures solutions. Le bon équilibre entre ces deux notions dépend du problème à résoudre, de son paysage de recherche, et des réglages de l'algorithme utilisé.

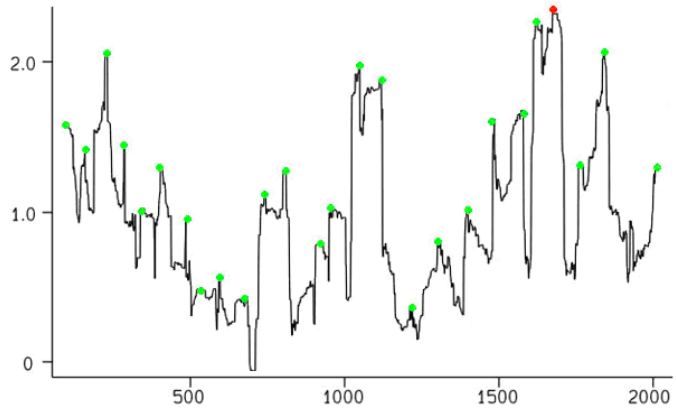


Figure 19. Exemple de paysage de recherche d'une fonction d'une seule variable, avec un seul extremum global (rouge) et plusieurs extrema locaux (vert)

On ne connaît toujours pas de méthode universelle permettant de trouver les extrema globaux d'une fonction arbitraire. Mais, parmi les heuristiques, certaines sont des méthodes génériques pouvant optimiser une large gamme de problèmes différents pour lesquels on ne connaît pas de méthode classique plus efficace, sans

nécessiter de changements profonds dans l'algorithme employé : les méta-heuristiques. Elles utilisent un haut niveau d'abstraction, dont l'intérêt majeur est la facilité d'utilisation dans des problèmes concrets. De plus, elles sont efficaces pour atteindre un optimum avec une précision acceptable, dans un temps raisonnable (coût polynomial faible, en général).

Les plus connues sont le recuit simulé (inspiré par la thermodynamique), les AE (inspirés par l'évolution des populations biologiques), les algorithmes de colonies de fourmis (inspirés par le comportement collectif et stigmergique d'insectes sociaux), l'optimisation par essaims de particules (inspirée du comportement des oiseaux, des insectes et des poissons, lesquels convergent collectivement vers un objectif en n'ayant qu'une perception locale de leur environnement).

L'utilisation de méta-heuristiques comme les AE peut paraître relativement simple en première approche, mais il est impératif d'adapter l'algorithme au problème à traiter, sous peine de résultats médiocres. Tout d'abord, principalement dans le cadre de l'optimisation combinatoire, le choix de la représentation des solutions manipulées peut être crucial. Ensuite, la plupart des méta-heuristiques disposent de paramètres dont le réglage n'est pas nécessairement trivial. Enfin, obtenir de bonnes performances passe généralement par une phase d'adaptation des diverses étapes de l'algorithme (initialisation, notamment). En pratique, seuls le savoir-faire et l'expérience de l'utilisateur permettent de gérer ces difficultés.

Mais les méta-heuristiques, du fait de leur capacité à être utilisées sur un grand nombre de problèmes différents, se prêtent facilement à des extensions. Citons notamment :

- l'optimisation multicritère, où il faut optimiser plusieurs objectifs contradictoires. La recherche vise non pas à trouver un optimum global, mais un ensemble d'optima « au sens de Pareto » formant la « surface de compromis » du problème, qu'il s'agira ensuite d'explorer « manuellement » (section 4.3).

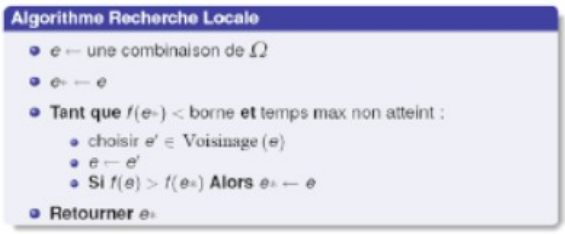
- l'optimisation multimodale [26], où LE BUT EST DE TROUVER UN ENSEMBLE D'OPTIMA LOCAUX DE BONNE QUALITÉ, SANS NÉCESSAIREMENT SE LIMITER AU SEUL OPTIMUM GLOBAL. LES ALGORITHMES « GÉNÉTIQUES » SONT PARTICULIÈREMENT BIEN ADAPTÉS À CELA, DE PAR LEUR NATURE DISTRIBUÉE. LES VARIANTES DE TYPE MULTI-POPULATIONS EXPLOITENT EN PARALLÈLE PLUSIEURS POPULATIONS QUI S'ATTACHENT À DÉTECTER PLUSIEURS OPTIMA DISTINCTS.

- l'optimisation de problèmes bruités, où il existe une incertitude sur le calcul de la fonction objectif, dont il faut alors tenir compte dans la recherche de l'optimum.

- l'optimisation dynamique, où la fonction objectif varie dans le temps. Il faut alors approcher au mieux l'optimum à chaque pas de temps.

- la parallélisation, où l'on cherche à accélérer la vitesse des algorithmes en répartissant la charge de calcul sur des unités fonctionnant de concert. Le problème revient alors à adapter les méta-heuristiques pour qu'elles soient distribuées, et les algorithmes évolutionnaires font partie des rares algorithmes d'optimisation à être parallélisables, notamment sur les GPU et les clusters [27].

- l'hybridation, qui vise à tirer parti des avantages respectifs de méta-heuristiques différentes en les combinant (section 4.9). Souvent, elle convoque une méthode désormais classique, appelée « recherche locale », qui, partant d'une solution initiale arbitraire ou donnée, sélectionne de proche en proche une solution voisine. La force de cette technique dépend bien sûr du type de fonction de voisinage choisi, et de l'*ergodicité* des transformations (c'est-à-dire la possibilité d'atteindre une solution optimale à partir de n'importe quelle solution initiale).



3.3.3 BIO-INSPIRATION : L'ÉVOLUTION NATURELLE

3.3.3.1 HISTORIQUE ET ÉTAT ACTUEL DES THÉORIES DE L'ÉVOLUTION

Même si le terme « théorie » est souvent employé pour désigner quelque chose d'hypothétique (une conjecture), donc de temporaire, l'évolution des êtres vivants est un fait scientifiquement reconnu : tous les organismes vivants sont unis par des liens de descendance. Le terme « théorie » désigne à l'égard de l'évolution un ensemble de connaissances admises, essentiellement sur l'observation et l'analyse d'un très grand nombre de fossiles, et depuis moins de dix ans sur la comparaison du patrimoine génétique d'espèces vivantes (ADN), ainsi que sur des modélisations informatiques (évolution artificielle). Elle ne peut s'appuyer qu'extrêmement rarement sur l'expérience (rarement reproductible, étant données les échelles de temps impliquées), bien qu'il existe des laboratoires « in-vivo » dans quelques endroits du monde où des chercheurs tentent de l'observer.

On distingue dans la communauté scientifique trois modalités d'explication des phénomènes d'évolution défendues historiquement : l'évolution darwinienne (on parle désormais de néo-darwinisme, englobant le darwinisme historique et la génétique, inconnue à l'époque de Darwin), l'évolution lamarckienne et l'évolution baldwinienne.

La théorie néo-darwinienne est la plus connue, car elle donne une explication plausible d'un grand nombre de comportements évolutifs observés dans le monde du vivant. Darwin décrit en 1859 l'ensemble des espèces vivantes sur une grande échelle de temps par un arbre de vie constitué d'organismes apparentés les uns aux autres. Le mécanisme néo-darwinien est basé sur la conjonction de deux phénomènes : d'une part la sélection naturelle imposée par le milieu – les individus les plus adaptés à leur environnement se reproduisent plus « efficacement » et survivent – et d'autre part des variations non dirigées du « matériel génétique des espèces » (explication ultérieure à Darwin). La nature utiliserait ainsi le *hasard* et la *sélection naturelle* pour faire évoluer graduellement les espèces, même si Darwin reconnaît le peu de formes transitoires observables. Ce sont les deux principes qui sous-tendent les premiers algorithmes évolutionnaires[26].

Lamarck est en quelque sorte l'aïeul des théories de l'évolution car il est le premier à en proposer un mécanisme en 1809 [32], en suggérant qu'un individu pourrait transmettre des caractères acquis de son vivant directement à sa descendance, et ainsi s'adapter plus rapide à son environnement. On traduirait cela avec le vocabulaire actuel en disant que le phénotype agit sur le génotype. Ce mécanisme d'hérédité des caractères acquis devait se révéler globalement erroné. Il n'est reconnu aujourd'hui que dans quelques détails d'épigénétique, épiphénomènes à l'échelle des temps paléontologiques.

[26]Le paradigme darwinien qui a inspiré ces algorithmes ne saurait en aucun cas être une justification pour leur emploi – pas plus que le vol des oiseaux ne peut justifier l'invention de l'avion. Il y a maintenant suffisamment d'exemples de succès pratiques (a posteriori) de ces algorithmes pour ne pas avoir à recourir à ce type d'argument.

Enfin, l'approche baldwinienne [33], plus tardive (1896), est une façon de concilier lamarckisme et darwinisme, sans requérir l'hypothèse discréditée de Lamarck selon laquelle l'apprentissage affecterait directement le génome. La sélection ne se fait pas uniquement selon des caractéristiques innées des individus, mais aussi en fonction de leur expérience : elle dépend à la fois de l'aptitude de l'individu à apprendre et à s'adapter à son milieu. Exprimé d'une autre façon, l'effet Baldwin est un processus séquentiel dans lequel des caractères acquis individuellement sous l'effet de l'environnement peuvent éventuellement, sous l'influence de la sélection naturelle, être renforcés ou remplacés par des caractères héréditaires semblables (génétiques). Cette théorie est convoquée pour expliquer quelques mécanismes biologiques difficiles à interpréter autrement : les callosités des oiseaux ou des mammifères, les épines stipulaires des fourmis *Acacia*, la coaptation des phasmes [46]. Et elle est souvent utilisée dans des expérimentations en évolution artificielle, tout comme le lamarkisme.

Il existe à l'heure actuelle de nombreuses recherches sur l'évolution du vivant, et la situation est loin d'être figée dans les sciences de l'évolution. L'équation « évolution = néo-darwinisme » ne fait plus l'unanimité chez les chercheurs, car elle est loin de rendre compte de toutes les observations liées à l'évolution des espèces vivantes, notamment les transitions rapides d'une espèce à une autre, et l'existence de formes de vie depuis longtemps mal adaptées à leur milieu, et qui pourtant survivent bien, comme l'a montré l'éthologue Rémy Chauvin [42].

L'étude de l'évolution interroge désormais quatre domaines scientifiques majeurs en interaction : la paléontologie, la biologie moléculaire, la génomique et la théorie de la complexité qui a considérablement progressé en étudiant le vivant.

Certains travaux visent à montrer que le champ d'action de la théorie néo-darwinienne se limiterait à la micro-évolution – favorisant effectivement l'adaptation environnementale, et où l'optimisation génétique joue pleinement son rôle - mais que la transition d'une espèce à une autre relèverait de phénomènes de macro-mutations et de phénomènes plus complexes. Citons ici le paléontologue Jean Chaline [38] qui s'intéresse au nouveau domaine appelé « évo-dévo » qui fait le lien entre la génétique, le développement embryonnaire et la paléontologie, et dont les travaux suggèrent que de puissants gènes de régulation (appelés « gènes hox ») semblent contrôler l'architecture des organismes (donc la macro-évolution).

D'autres approches, dites « structuralistes », initiées entre autres par le zoologiste Pierre-Paul Grassé, s'intéressent à la classification des formes émergentes à partir des lois de la chimie et de la physique [34]. Citons déjà les travaux du biochimiste et généticien Michael Denton sur les formes des protéines [35}. Bien qu'il existe des dizaines de millions de protéines, il n'y a qu'un peu plus de mille formes de base pour celles-ci : elles se regroupent toujours en des structures morphologiquement limitées. Le prix Nobel de médecine Christian de Duve montre, quant à lui, que les lois biochimiques produisent des contraintes si strictes que le hasard mutationnel est canalisé [36]. Simon Conway-Morris, l'un des plus grands paléontologues actuels, montre qu'au sein de l'évolution de nombreuses voies conduisent à des résultats quasi-identiques, qu'il appelle « des convergences » vers des formes biologiques en nombre finalement assez limité [37]. Cette approche postule l'existence de quelque chose d'analogue à des attracteurs en mathématiques, par lesquels les trajectoires évolutionnistes sont canalisées vers des formes fonctionnelles stables, possédant une logique interne. Enfin, des tenants de la complexité émergente des formes de vie (Brian Goodwin [39], Mae Wan Ho [40], Marcel-Paul Schützenberger [41]) montrent que l'auto-organisation est un processus plus puissant que la sélection naturelle pour expliquer la stabilité des formes de vie complexes, lesquelles ne peuvent être atteintes par des processus d'essais-erreurs.

3.3.3.2 ÉVOLUTION BIOLOGIQUE ET GÉNÉTIQUE

Il a fallu un siècle de travail après la publication de la théorie darwinienne pour comprendre la base génomique de l'évolution. L'ADN, macro-molécule remarquable composée de séquences de paires de bases appelées nucléotides (4 lettres possibles : A, C, G, T), et dotée de la capacité d'auto-réparation, a été

découverte par Crick et Watson en 1953. Les molécules d'ADN sont elles-mêmes empaquetées dans des chromosomes (24 pour l'homme) résidant dans le noyau de chaque cellule, et forment la chromatide. Une instruction de l'ADN est appelée gène, et peut être constituée de centaines ou de milliers de nucléotides. Mais leur détermination exacte est équivoque car empirique. Les différentes « valeurs » d'un gène sont appelées allèles.

Le dôme central de la génétique est que l'ensemble des caractéristiques d'un organisme sont codées dans ses gènes. Toutes les fonctions les plus élaborées des cellules qui le composent sont régentées par l'ordre dans lequel ces lettres du script apparaissent sur les différents chromosomes. C'est le livre des milliards d'instructions d'une espèce (3,1 milliard pour l'homme), le logiciel de la cellule en quelque sorte (mais ce n'est pas un code séquentiel), et aussi le plan d'organisation de l'organisme vivant. Chaque organisme possède 2 versions de chaque gène : celles de ses deux parents, à l'exception de ceux présents sur les chromosomes X et Y. Lors de la fusion de gamètes, des gènes parentaux peuvent se croiser (ce que l'on appelle enjambement ou crossing-over) en passant d'une chromatide à l'autre pour assurer un brassage génétique optimal de la génération suivante. Dès lors, le zygote contient toutes les informations nécessaires pour se transformer en organisme vivant, par un processus complexe de segmentation et de différentiation cellulaire.

Les protéines qui construisent les cellules (et donc les organes), sont constituées de chaînes d'acides aminés. Ces derniers, au nombre de 20, sont codés par trois lettres successives sur l'ADN (les codons). Les protéines sont fabriquées directement par décodage d'un ou de plusieurs gènes à partir de la réplication partielle de fragments d'ADN (rôles de l'ARN et du ribosome du cytoplasme). Or, le nombre de combinaisons possibles de codons est de 64, ce qui signifie qu'il y a de la redondance dans le code génétique, ainsi que des séquences non codantes d'acides aminés, et qui servent à autre chose (notamment un codon « start » et trois codons « stop »).

Le taux de mutation spontané actuellement mesuré dans le monde animal lors de la recopie de l'ADN est de un sur cent millions de nucléotides, soit environ soixante mutations en moyenne à chaque reproduction humaine. Mais il existe de puissants mécanismes de correction au niveau enzymatique permettant de réduire ce taux jusqu'à $1/10^{13}$, ce qui limite considérablement les mutations lors de la reproduction des cellules durant la vie. Et dans la plupart des cas, les mutations sont sans influence, car elles touchent des espaces de nucléotides non codants. Cependant, des chercheurs en bio-informatique et en génétique ont pu montrer que certains de ces espaces de nucléotides « non codants » ont un rôle de régulateur du génome qui peut être important [44].

L'ensemble du génome humain a fini d'être « lu » en avril 2003, par l'équipe américaine de Francis Collins [45]. Ses analyses ont confirmé que seule une toute petite partie de l'ADN est requise pour coder des protéines (20000 à 25000 gènes, soit 1,5%). Mais la complexité d'un organisme dépendrait moins du nombre de ses gènes que de la manière dont ils sont utilisés. Un autre résultat concerne la phylogénie, c'est-à-dire l'étude des parentés entre différents individus d'une même espèce. En matière d'ADN, les êtres humains sont identiques à 99,9%, et ils semblent bien être les seuls à posséder une telle propriété, car l'ADN des autres espèces est largement plus diversifié que le nôtre. Les généticiens des populations confirment ces faits, et concluent que l'homme descend d'un groupe de « fondateurs » évalué approximativement à 10000 individus ayant vécu il y a environ 100000 à 150000 ans en Afrique de l'Est.

Les biologistes et les généticiens n'en sont qu'aux prémices de la compréhension des mécanismes de la morphogenèse des êtres vivants - c'est-à-dire du passage du génotype (code ADN) au phénotype (l'être vivant) - et que de nombreux liens entre l'évolution temporelle des espèces et la morphogenèse restent encore à découvrir. D'autant que les récentes études du généticien Andras Paldi et de l'embryologiste Rosine Chandebois remettent en question la théorie actuellement dominante du déterminisme génétique. Ils suggèrent une forme d'hérédité épigénétique où l'ensemble des protéines et micro-organites qui sont dans le cytoplasme (qui assurent des propriétés métaboliques et structurelles), participent à la morphogenèse autant que les gènes de l'ADN [43].

3.3.4 ALGORITHMES ÉVOLUTIONNAIRES

« Les algorithmes évolutionnaires sont des algorithmes d'optimisation stochastique fondés sur un parallèle grossier avec l'évolution darwinienne des populations biologiques. Ils fournissent une approche heuristique, à l'occasion performante, et dans certains cas prouvée » (Marc Shoenauer)

3.3.4.1 GÉNÉRALITÉS

Les AE sont classés parmi les méta-heuristiques d'intelligence calculatoire. Formellement, ce sont des algorithmes d'optimisation globale stochastique d'ordre 0 : aucune propriété de continuité ni de dérivabilité n'est nécessaire au bon déroulement de la méthode, seule la connaissance des valeurs de la fonction à optimiser aux points d'échantillonnages est requise (parfois même une approximation suffit). Ils présentent deux points forts :

d'une part leur souplesse d'emploi, puisqu'ils peuvent optimiser des fonctions non régulières, définies sur des espaces quelconques, non restreints aux espaces de recherche paramétriques dans lesquels la solution est cherchée sous forme d'un vecteur de paramètres de taille fixe, comme les espaces de recherche non standard (listes, graphes,...),

d'autre part leur robustesse face aux optima locaux. Ils sont aujourd'hui couramment utilisés pour trouver les optima de fonctions difficiles ou définies sur des espaces non-standards (ex : espaces de listes, de graphes), et pour des problèmes qui sont pour le moment hors d'atteinte des méthodes déterministes connues.

NB : la synthèse qui suit est basée en grande partie sur des cours d'une grande qualité donnés par Marc Schoenauer et Pierre Collet à l'École Polytechnique entre 2004 et 2010, et publiés sur les sites internet des auteurs :http://www.lri.fr/~marc/ *et* http://lsiit-cnrs.unistra.fr/fdbt-fr/index.php/Pierre_Collet.

3.3.4.2 TERMINOLOGIE ET NOTATIONS

On cherche à optimiser une fonction f à valeurs réelles définie sur un espace de recherche Ω (figure 1). Le parallèle avec l'évolution naturelle a entraîné l'apparition d'un vocabulaire spécifique :

la fonction objectif f est appelée fonction *performance*, ou fonction *d'adaptation* (*fitness*) ;

les points de l'espace de recherche Ω sont appelés des *individus* ;

les tuples d'individus sont appelés des *populations* ;

on parle d'une *génération* pour la boucle principale de l'algorithme.

Le temps de l'évolution est supposé discrétisé, et on notera Π_i la population de taille fixe P à la génération i.

3.3.4.3 SCHÉMA GÉNÉRAL D'UN ALGORITHME ÉVOLUTIONNAIRE

La plupart des AE reposent sur une vision darwinienne relativement simpliste et une optimisation stochastique résumées dans le diagramme de la Figure 2. L'algorithme fait évoluer une population de solutions Π. Cette évolution résulte : d'une part d'un darwinisme artificiel, qui se manifeste par la sélection et le remplacement et ne dépend que de la performance f ; d'autre part de l'effet du hasard, qui s'exprime

dans l'initialisation et les opérateurs de variation, et ne dépend que de la représentation de l'espace de recherche.

L'idée fondamentale est que la sélection favorise les individus qui optimisent la performance et que les variations font apparaître dans la population sélectionnée des individus que l'on peut espérer meilleurs au regard de la performance. Dans cette évolution, les générations successives de la population restent à taille constante et l'aspect stochastique ne dépend que de la génération précédente.

La pression de l'environnement, qui est simulée à l'aide de la fonction d'adaptation *f*, et les principes darwiniens de sélection naturelle et de variations aveugles sont implémentés dans l'algorithme de la manière suivante :

initialisation de la population Π_0 en choisissant P individus dans Ω, généralement par tirage aléatoire avec une probabilité uniforme sur Ω ;

évaluation des individus de Π_0 (calcul des valeurs de *f* pour tous les individus) ;

la génération i construit la population Π_i a partir de la population Π_{i-1} :

- sélection des individus les plus performants de Π_{i-1} au sens de *f* (les plus adaptés se reproduisent) ;

- application (avec une probabilité donnée) des opérateurs de variation aux parents sélectionnés, ce qui génère de nouveaux individus, les enfants. On parle de mutation pour les opérateurs unaires, et de croisement pour les opérateurs binaires (ou n-aires). A noter que cette étape est toujours stochastique ;

- évaluation des enfants ;

- remplacement de la population Π_{i-1} par une nouvelle population créée à partir des enfants et/ou des vieux parents de la population Π_{i-1} au moyen d'une sélection darwinienne (les plus adaptés survivent).

l'évolution stoppe quand le niveau de performance souhaité est atteint, ou qu'un nombre fixe de générations s'est écoulé sans améliorer l'individu le plus performant.

La mise en place et l'ajustement d'un AE sont complexes et le coût de calcul peut être important. Ainsi, il est utile de noter que, dans les applications (par exemple les problèmes d'optimisation topologique de structures), l'essentiel du coût-calcul des AE provient de l'étape d'évaluation (calcul des performances) : les tailles de populations sont de l'ordre de quelques dizaines, le nombre de générations de quelques centaines, ce qui donne lieu le plus souvent à plusieurs dizaines de milliers de calculs de *f*.

La suite de cette section va détailler les principaux composants des AE, en donnant des exemples concrets. Mais nous allons au préalable définir quelques notions-clés pour la compréhension du fonctionnement de ces algorithmes en pratique.

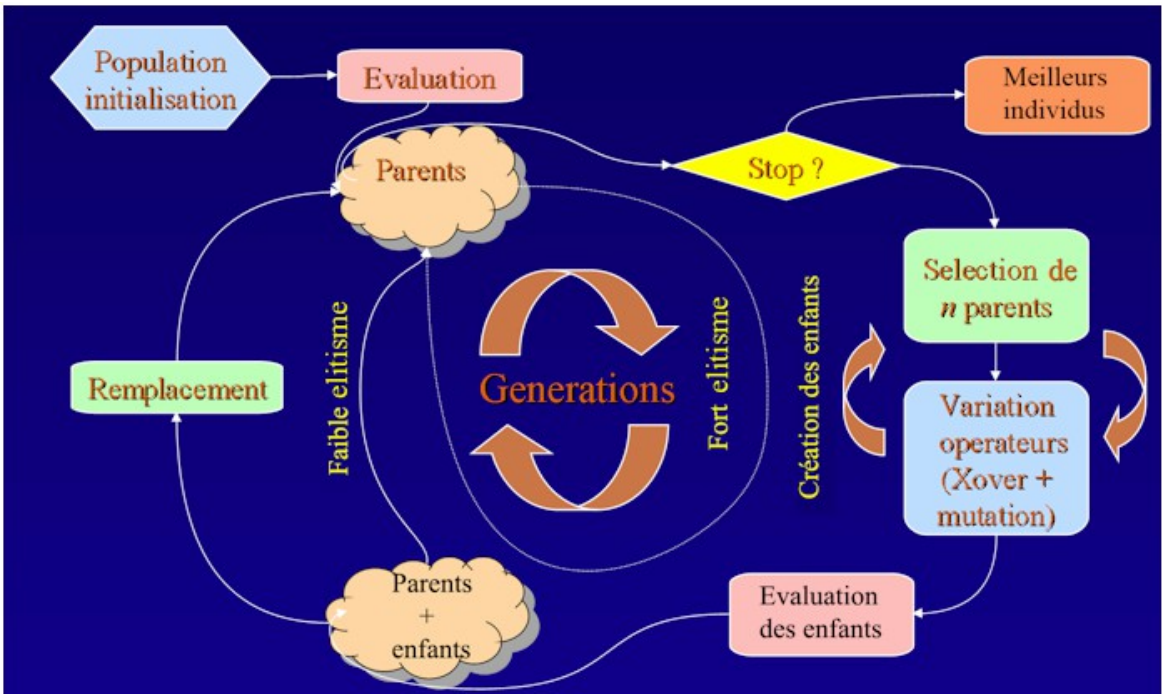


Figure 20. Schéma général d'un algorithme évolutionnaire (source : Pierre Collet, cours de l'Ecole Polytechnique, 2007).

3.3.4.4 ESPACES DE REPRÉSENTATION

La composante principale de l'algorithme, qui est en fait préalable à toutes les autres, est la représentation ou choix de l'espace de recherche. Dans de nombreux cas, l'espace de recherche est totalement déterminé par le problème : c'est l'espace Ω sur lequel est définie la fonction objectif *f*. Mais il est toujours possible de transporter son problème dans un espace habilement choisi (changement de variables) dans lequel il sera plus aisé de définir des opérateurs de variation efficaces. Cet espace est alors appelé *espace génotypique*, et l'espace de recherche initial Ω, dans lequel est calculée la performance des individus, est appelé *espace phénotypique*.

On peut alors répartir les diverses étapes de l'algorithme en deux groupes : celles relatives au darwinisme artificiel (sélection et remplacement), qui ne dépendent que des valeurs prises par *f*, et pas de la représentation choisie, c'est-à-dire pas de l'espace génotypique ; et celles qui sont intimement liées à la nature de cet espace de recherche. Ainsi, l'initialisation et les opérateurs de variation sont spécifiques aux types de génotypes, mais par contre ne dépendent pas de la fonction objectif *f* (c'est le principe darwinien des variations non dirigées).

3.3.4.5 RÉGLAGE D'UN AE – LE COMPROMIS EXPLORATION / EXPLOITATION

Le terme de *diversité génétique* désigne la variété des génotypes présents dans la population. Elle devient nulle lorsque tous les individus (ou les groupes d'individus en optimisation multi-objectifs) sont identiques – on parle alors (a posteriori) de convergence de l'algorithme. Mais il est important de savoir que lorsque la diversité génétique devient très faible, il y a très peu de chances pour qu'elle augmente à nouveau. Et si cela se produit trop tôt, la convergence a lieu vers un optimum local – on parle alors de convergence prématurée. Il faut donc préserver la diversité génétique, sans pour autant empêcher la convergence.

Un autre point de vue sur ce problème est celui du dilemme *exploration-exploitation*. A chaque

étape de l'algorithme, il faut effectuer le compromis entre explorer l'espace de recherche, afin d'éviter de stagner dans un optimum local, et exploiter les meilleurs individus obtenus, afin d'atteindre de meilleurs valeurs aux alentours. Trop d'exploitation entraîne une convergence vers un optimum local, alors que trop d'exploration entraîne la non-convergence de l'algorithme.

Typiquement, les opérations de sélection et de croisement sont des étapes d'exploitation, alors que l'initialisation et la mutation sont des étapes d'exploration (bien que de multiples variantes d'AE s'écartent de ce schéma général). On peut ainsi régler les parts respectives d'exploration et d'exploitation en jouant sur les divers paramètres de l'algorithme (probabilités d'application des opérateurs, pression de sélection...). Les opérateurs de croisement et de mutation permettent aussi d'insérer une expertise dans le problème à résoudre. Malheureusement, il n'existe pas de réglages universels et seuls des résultats expérimentaux donnent une idée du comportement des divers composantes des algorithmes.

Nous allons passer à présent en revue les implémentations de la sélection naturelle, indépendantes de toute application, puis nous détaillerons les celles des opérateurs de variation dépendant de l'application dans les deux espaces de recherche les plus courants que sont les chaînes de bits et les vecteurs de variables réelles.

3.3.5 DE LA SÉLECTION NATURELLE À LA SÉLECTION ARTIFICIELLE

La partie darwinienne de l'algorithme comprend les deux étapes de *sélection* et de *remplacement*. Ces étapes, rappelons-le, sont totalement indépendantes de l'espace de recherche.

D'un point de vue technique, la différence essentielle entre l'étape de sélection et l'étape de remplacement est qu'un même individu peut être sélectionné plusieurs fois durant l'étape de sélection (ce qui correspond au fait d'avoir plusieurs enfants), alors que durant l'étape de remplacement, chaque individu est sélectionné une fois (et il survit) ou pas du tout (et il disparaît à jamais). Enfin, comme il a déjà été dit, la procédure de remplacement peut impliquer soit les enfants seulement, soit également la population précédente dans son ensemble. Ceci mis à part, les étapes de sélection et de remplacement utilisent des procédures similaires de choix des individus, dont les plus utilisées vont maintenant être passées en revue.

On distingue deux catégories de procédures de sélection ou de remplacement (par abus de langage, on appelle sélection les deux types de procédures) : les procédures *déterministes* et les procédures *stochastiques*.

3.3.5.1 SÉLECTION DÉTERMINISTE

On sélectionne les meilleurs individus au sens de la fonction performance. Si plus de quelques individus doivent être sélectionnés, cela suppose un tri de l'ensemble de la population, mais cela ne pose un problème de temps calcul que pour des très grosses tailles de population. Les individus les moins performants sont totalement éliminés de la population, et le meilleur individu est toujours sélectionné. On dit que cette sélection est *élitiste*.

3.3.5.2 SÉLECTION STOCHASTIQUE

Il s'agit toujours de favoriser les meilleurs individus, mais ici de manière stochastique, ce qui laisse une chance aux individus moins performants. Par contre, il peut arriver que le meilleur

individu ne soit pas sélectionné, et qu'aucun des enfants n'atteigne une performance aussi bonne que celle du meilleur parent.

Le tirage de *roulette* est la plus célèbre des sélections stochastiques. Supposant un problème de maximisation avec uniquement des performances positives, elle consiste à donner à chaque individu une probabilité d'être sélectionné proportionnelle à sa performance. Comme avec une vraie roulette, on lance la boule dans l'espace des individus, et l'on choisit l'individu dans le secteur duquel la boule a fini sa course. Le tirage de roulette présente toutefois de nombreux inconvénients, en particulier reliés à l'échelle de la fonction performance : alors qu'il est théoriquement équivalent d'optimiser f et $\alpha f + \beta$ pour tout $\alpha > 0$, il est clair que le comportement de la sélection par roulette va fortement dépendre de α dans ce cas. C'est pourquoi, bien qu'il existe des mécanismes de mise de mise à l'échelle pour ajuster les paramètres α et β à chaque génération, cette sélection est totalement abandonnée aujourd'hui.

La sélection par le *rang* consiste à faire une sélection en utilisant une roulette dont les secteurs sont proportionnels aux rangs des individus (P pour le meilleur, 1 pour le moins bon, pour une population de taille P). La variante linéaire utilise directement le rang, les variantes polynomiales remplaçant ces valeurs par $(i/p)^{\alpha}$, $\alpha > 0$. Le point essentiel de cette procédure de sélection est que les valeurs de f n'interviennent plus, seuls comptent les positions relatives des individus entre eux. Optimiser f et $\alpha f + \beta$ est alors totalement équivalent.

La sélection par *tournoi déterministe* n'utilise aussi que des comparaisons entre individus et ne nécessite même pas de tri de la population. Elle possède un paramètre d'arité T, taille du tournoi. Pour sélectionner un individu, on en tire T uniformément dans la population, et on sélectionne le meilleur de ces T individus. Le choix de T *permet de faire varier la pression sélective* ($T = 7$ est une bonne valeur pour une population entre 100 et 1000 individus), c'est-à-dire les chances de sélection des plus performants par rapport aux plus faibles. A noter que le cas $T = 2$ correspond, en espérance et au premier ordre en fonction de P, à la sélection par le rang linéaire.

Enfin, on a la sélection par *tournoi stochastique*, qui est probablement le meilleur mode de sélection actuel pour régler finement la pression de sélection, et le plus rapide aussi. Elle consiste à se donner un paramètre réel t entre 0.5 et 1, et à choisir uniformément 2 individus (avec ou sans remise) pour ne retenir que le meilleur avec probabilité t. Utilisé en conjonction avec le tournoi déterministe, on peut choisir la pression de sélection de manière quasi-continue, de très faible (tournoi stochastique avec probabilité juste > à 0.5) à très forte, avec un tournoi déterministe à grande arité T.

3.3.5.3 SÉLECTIONS MULTI-CRITÈRES

Toutes les techniques de sélection présentées ci-dessus concernent le cas d'une seule fonction objectif à valeurs réelles. Cependant, la plupart des problèmes sont en fait *multi-critères*, c'est-à-dire que l'on cherche à optimiser simultanément plusieurs objectifs, souvent contradictoires (typiquement, maximiser la qualité d'un produit en minimisant son prix de revient). Les vieilles techniques les plus utilisées pour résoudre de tels problèmes consistaient soit à *agréger* les objectifs en une fonction unique (par combinaison linéaire, par exemple), soit à considérer tous les objectifs sauf un comme des contraintes.

Or, les AE sont une des rares méthodes d'optimisation offrant des alternatives élégantes et efficaces permettant la prise en compte « globale » de telles situations : il « suffit » de modifier les étapes darwiniennes d'un AE pour le changer en un algorithme d'optimisation multi-critères, et obtenir des familles de solutions optimisées, au lieu de n'en avoir qu'une seule, en général.

3.3.5.3.1 FRONT DE PARETO

Dans un problème multi-critères dans lequel on cherche à optimiser plusieurs objectifs contradictoires, on appelle *front de Pareto* l'ensemble des points de l'espace de recherche tels qu'il n'existe aucun point qui soit strictement meilleur qu'eux sur tous les critères simultanément. Autrement dit, on ne peut plus améliorer un critère sans détériorer au moins l'un des autres. Il s'agit de l'ensemble des meilleurs compromis réalisables entre les objectifs contradictoires, et le but de l'optimisation va être d'identifier cet ensemble de compromis optimaux entre les critères.

Plus formellement, soient $f_1, \ldots, f_n$ les objectifs qu'on cherche à minimiser sur l'espace de recherche Ω, et x et y deux points de Ω. On dit que « x domine y au sens de Pareto », noté $x \succ y$ si :

$$\forall i \in [1,n],\ f_i(x) \leq f_i(y) \text{ et } \exists j \in [1,n],\ f_j(x) < f_j(y) \qquad (1)$$

La Figure 3 donne un exemple de front de Pareto : l'ensemble de l'espace de recherche est représenté dans l'espace des objectifs, et les points extrémaux pour la *relation de dominance* (1) forment le front de Pareto du problème (à noter que l'on n'est pas toujours dans une situation aussi régulière que celle présentée Figure 3, et que le front de Pareto peut être concave, discontinu,...).

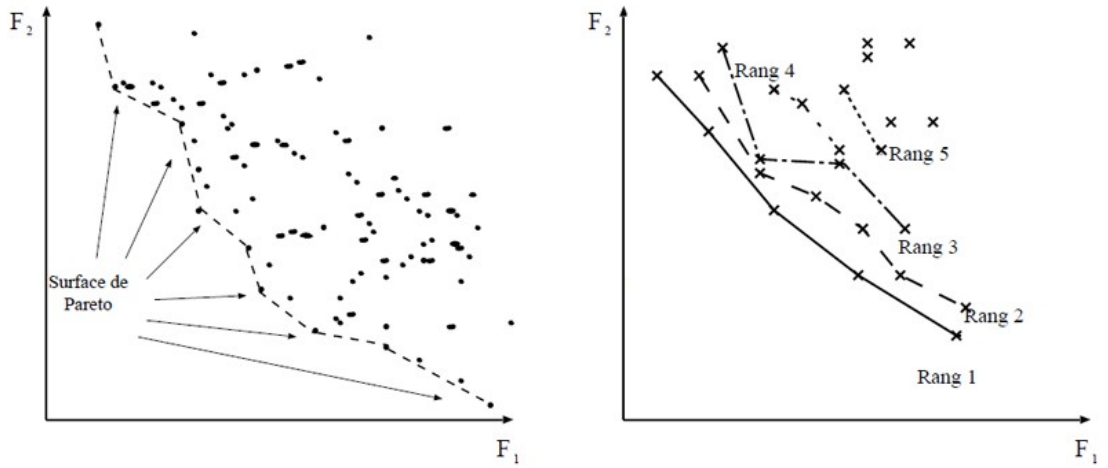


Figure 21. Front(s) de Pareto et rangs de Pareto pour un problème de minimisation à deux objectifs. (a) les points extrémaux de l'ensemble de l'espace de recherche forment le front de Pareto du problème. (b) une population donnée est partiellement ordonnée par la relation de dominance au sens de Pareto.

3.3.5.3.2 SÉLECTIONS DE PARETO

Lorsque l'on s'intéresse à l'optimisation multi-critères au sens de Pareto, il est possible de remplacer l'étape de sélection telle qu'elle a été décrite dans la Section 4.2 par des sélections basées sur la notion de dominance au sens de Pareto (1). Cependant, cette relation étant une relation d'ordre partiel, il faut rajouter une procédure de *choix secondaire* entre individus non comparables au sens de Pareto.

Critères de Pareto. Le plus utilisé des critères de sélection est le *rang de Pareto*, défini itérativement de la manière suivante : les individus non-dominés de la population courante sont dits de rang 1. Ils sont retirés de la population, et la procédure est itérée pour obtenir les rangs 2, 3, … Les individus de rang 1 (non dominés) sont une approximation du front de Pareto du problème.

La *force de domination* est le nombre d'individus de la population courante qu'un individu donné domine : plus un individu en domine d'autres, plus il est intéressant à conserver comme géniteur. De même, la *profondeur au sens de Pareto* d'un individu est le nombre d'autres individus de la population qui dominent un individu donné – un individu est d'autant plus intéressant à conserver qu'il est dominé par un petit nombre d'autres collègues.

Critères de diversité. Les critères précédents ne permettent pas d'ordonner toute la population – en fait, assez rapidement, les individus de la population courante qui vont approcher le front de Pareto sont non comparables entre eux. Il faut donc ajouter un autre critère pour les départager.

Différents critères ont été proposés pour favoriser la diversité, le plus populaire étant *la distance de peuplement*, définie comme suit :

- pour chaque objectif i, on ordonne la population par valeurs croissantes de l'objectif ;

- pour chaque individu p, on définit d_i, distance de peuplement partielle selon l'objectif i comme la somme des distances de p à ses deux plus proches voisins dans la liste ordonnée ;

- la distance de peuplement totale D_p est donnée par la somme sur l'ensemble des objectifs des distances partielles.

Tournois au sens de Pareto. Pour sélectionner un géniteur à l'aide des outils définis ci-dessus, on utilise un tournoi en comparant tout d'abord les individus selon le critère de Pareto choisi, puis, en cas d'égalité, suivant le critère de diversité retenu.

3.3.5.3.3 MÉTHODE DE JASZKIEWICZ : RETOUR SUR UNE FITNESS UNIQUE ?

Il s'agit d'un méthode assez récente [63], dont le but est de trouver un ensemble de bonnes solutions non-dominées (estimation du front) en utilisant une fitness unique, combinant aléatoirement les n objectifs indépendants f_i. La méthode originale - MOGLS (Mutli Objective Genetic Local Search) – date de 1996 :elle est due à Ishibuchi et Murata [66]. A chaque génération les nouvelles solutions sont améliorées grâce à une méthode de recherche locale, optimisant une somme pondérée des critères, dont le jeu de poids est tiré aléatoirement. En 2001, Jaszkiewicz montre que l'algorithme MOGLS, bien que basé sur une agrégation linéaire des critères le rapprochant des méthodes de « programmation par but », n'effectue pas pour autant une transformation vers un uni-objectif, du fait de sa structure d'AG permettant une recherche simultanée de solutions multiples dans des directions multiples. MOGLS tire parti de résultats prouvant que l'intégralité du front de Pareto peut être obtenu en résolvant un problème de « programmation par but » pour l'ensemble de jeux de poids possibles.

En 2002, Jaszkiewicz propose une seconde version de l'algorithme MOGLS, plus efficace, où la somme pondérée est remplacée par une distance de Tchebycheff pondérée [63]. Il montre que « les fonctions scalarisantes de Tchebycheff » sont plus adaptées que les fonctions linéaires pour des problèmes où la forme du front de Pareto est complexe (par exemple non convexe). Et il fournit en outre une méthode efficace pour calculer un échantillon de solutions initiales.

Enfin, Ishibushi et al. [67] suggèrent une autre amélioration de l'algorithme MOGLS en exploitant l'idée que la performance de l'AG peut être accrue en utilisant dans la recherche locale une direction d'optimisation adaptée à chaque solution et indépendante du jeu de poids employés dans le mécanisme de sélection des parents. La méthode permet ainsi de séparer totalement évolution génétique et exploration du voisinage des solutions, et peut donc s'adapter facilement à tout type de recherche locale.

3.3.5.3.4 MAINTIEN DE LA DIVERSITÉ AU SEIN D'UNE POPULATION

Une autre évolution récente concerne le maintien de la diversité dans la population. La préservation de la diversité est essentielle dans une méthode à population, car elle empêche que l'ensemble des individus soit attiré dans une région unique de l'espace. En recherche uni-critère, elle permet d'éviter le piège des minima locaux ; en multicritère, elle garantit une répartition uniforme des solutions le long du front de Pareto. Traditionnellement, le maintien de la diversité passe par une estimation de la densité locale dans l'espace des critères, afin soit de pénaliser les zones les plus denses lors de la sélection pour la reproduction, soit d'en retirer des individus lors de la mise à jour de la population. Elle est basée sur la notion de « voisinage » dans l'espace des critères, définie à l'aide de paramètres comme le rayon de voisinage ou la distance aux plus proches voisins, mais les valeurs de ces paramètres sont très difficiles à définir. Actuellement, l'une des meilleures solutions de mesure de la densité locale est la méthode PADE (Population

size Adaptive Density Estimation), qui ne nécessite aucun paramètre dont la valeur doit être définie par le décideur, et qui peut donc en théorie s'adapter à tout type de problème [68].

3.3.5.4 LES MOTEURS D'ÉVOLUTION

On regroupe sous ce nom les ensembles sélection/remplacement qui ne peuvent être dissociés lors des analyses théoriques du darwinisme au sein des AE. Un *moteur d'évolution* est donc la réunion d'une procédure de sélection et d'une procédure de remplacement. Toute combinaison des procédures présentées plus haut (et de bien d'autres encore) est licite. Toutefois, certaines combinaisons sont plus souvent utilisées, que ce soit pour des raisons historiques, théoriques ou expérimentales. Pour cette raison, les noms donnés sont souvent les noms des écoles historiques qui les ont popularisées – mais il faut garder à l'esprit que ces schémas sont totalement indépendants de l'espace de recherche, alors que nous verrons en 4.5 que les écoles historiques travaillaient sur des espaces de recherche bien précis.

3.3.5.4.1 ALGORITHME GÉNÉTIQUE GÉNÉRATIONNEL (GGA)

Ce moteur utilise une sélection stochastique pour sélectionner exactement P parents (certains parents peuvent donc être sélectionnés plusieurs fois, d'autres pas du tout). Ces P parents donnent ensuite P enfants par application des opérateurs de variation (avec probabilité donnée, voir section 4.6). Enfin, ces P enfants remplacent purement et simplement les P parents pour la génération suivante. La variante élitiste consiste à garder le meilleur des parents s'il est plus performant que le meilleur des enfants.

3.3.5.4.2 ALGORITHME GÉNÉTIQUE STATIONNAIRE (STEADY-STATE GA SSGA)

Dans ce moteur, un individu est sélectionné, généralement par tournoi, un second si le croisement doit être appliqué, et l'enfant résultant (après croisement et mutation éventuels) est réinséré dans la population en remplacement d'un vieil individu sélectionné par un tournoi inversé, dans lequel le moins performant (ou le plus vieux) disparaît.

3.3.5.4.3 STRATÉGIE D'ÉVOLUTION ((M ,+ Λ)-ES)

Deux moteurs sont regroupés sous ces appellations. Dans les deux cas, l'étape de sélection est un tirage uniforme (on peut dire qu'il n'y a pas de sélection au sens darwinien). A partir d'une population de taille μ (notations historiques), λ enfants sont générés par application des opérateurs de variation. L'étape de remplacement est alors totalement déterministe. Dans le schéma (μ, λ)-ES (avec $\lambda > \mu$), les μ meilleurs enfants deviennent les parents de la génération suivante, alors que dans le schéma ($\mu + \lambda$)-ES, ce sont les μ meilleurs des $\mu + \lambda$ parents plus enfants qui survivent [21].

3.3.5.4.4 ALGORITHME MULTI-OBJECTIF NSGA-II (NON-DOMINATED SORTING GENETIC ALGORITHM)

Cet algorithme utilise l'ordre total basé sur le rang de Pareto d'une part (ordre partiel) et la distance de peuplement en cas d'égalité du critère de Pareto (voir Section 4.3). Un tournoi basé sur cette relation d'ordre est utilisé pour la sélection des géniteurs, et le remplacement se fait de manière déterministe (suivant ce même ordre) parmi les parents plus les enfants.

Il existe de nombreuses autres variantes de moteurs d'évolution multi-objectif, qu'il est hors de notre propos de discuter ici. On se référera aux ouvrages [3, 16, 17] pour plus de détails.

Jusqu'à présent, nous n'avons évoqué dans cette section que des techniques génériques, applicables à tout

problème et surtout à tout espace de recherche. Nous allons maintenant faire un rapide survol des différentes écoles historiques d'AE, chacune étant de fait plus ou moins dédiée à un espace de recherche particulier. Les deux principaux contextes ainsi définis seront détaillés dans la dernière sous-section de cette introduction aux AE.

3.3.5.5 PRINCIPALES FAMILLES HISTORIQUES

Historiquement, trois grandes familles d'algorithmes ont été développées indépendamment, entre la moitié des années 1960 et 1970. Les premières méthodes furent les *stratégies d'évolution*, proposées par I. Rechenberg à partir de 1965, pour résoudre des problèmes d'optimisation continus. L'année suivante, Fogel, Owens et Walsh conçoivent la *programmation évolutionnaire* comme une méthode d'intelligence artificielle pour la conception d'automates à états finis. Enfin, en 1975, J. H. Holland propose les premiers *algorithmes génétiques*, pour l'optimisation combinatoire. La parution en 1989 du livre de D. E. Goldberg sur les algorithmes génétiques [19] rendra ceux-ci particulièrement populaires. Par la suite, ces différentes approches ont beaucoup évolué et se sont rapprochées, pour finir par êtres regroupées sous le terme générique d'algorithmes évolutionnaires, puis complétées par les *algorithmes à estimation de distribution* et l'*évolution différentielle*. La littérature sur le sujet est extrêmement abondante, et ces algorithmes sont considérés comme un domaine de recherche très prolifique.

3.3.5.5.1 LA PROGRAMMATION ÉVOLUTIONNAIRE (LAWRENCE FOGEL [13], 1963)

Imaginée par L.J. Fogel et ses coauteurs [13] dans les années 60, et reprise par son fils D.B. Fogel [23] dans les années 90, en Californie, elle fut mise au point initialement pour la découverte d'automates à états finis pour l'approximation de séries temporelles, puis a rapidement été généralisée à des espaces de recherche très variés. Elle ne travaille que sur le comportement des individus, n'utilise que des opérateurs de mutation et de remplacement agissant sur le phénotype, et pas d'opérateur de croisement. Le moteur utilisé ressemble à s'y méprendre à un (P + P)-ES – quoique développé complètement indépendamment – avec toutefois l'utilisation fréquente d'un remplacement plus stochastique que déterministe (tournoi) dans lequel les plus mauvais ont tout de même une petite chance de survie. Elle diffère en cela des stratégies d'évolution.

3.3.5.5.2 LES STRATÉGIES D'ÉVOLUTION (ES, INGO RECHENBERG ET H.P. SCHWEFEL

Les stratégies d'évolution [14, 15, 21, 22] ont été conçues par ces deux jeunes élèves-ingénieurs, au départ pour résoudre des problèmes d'optimisation continus (tuyères). Les SE ont été adaptées à l'optimisation combinatoire et appliquées à de nombreux problèmes de référence [22].

Dans sa version de base, l'algorithme manipule itérativement un ensemble de vecteurs de variables réelles, à l'aide d'opérateurs de mutation et de sélection, comme en programmation évolutionnaire, mais la recombinaison a été également introduite dans ces algorithmes [22]. Les moteurs d'évolution sont bien sûr les (μ +, λ)-ES (cf. section 4.4). La sélection s'effectue par un choix déterministe des meilleurs individus, selon l'échelle de valeur de la fonction objectif. L'étape de mutation est classiquement effectuée par l'ajout d'une valeur aléatoire à tous les composants de l'individu, tirée au sein d'une distribution normale.

L'algorithme le plus simple, noté (1+1)-ES, manipule un seul individu. A chaque itération, l'algorithme génère par mutation un individu enfant à partir de l'individu parent et sélectionne l'un ou l'autre pour le conserver dans la population (selon son adaptation). Le processus s'arrête quand l'écart entre deux individus de deux itérations successives est inférieur à un seuil.

Un énorme progrès a été apporté par les techniques auto-adaptatives d'ajustement des paramètres de mutation, et aujourd'hui le meilleur algorithme pour les problèmes purement numériques est un descendant

de la méthode historique, l'algorithme CMA-ES [17, 15], basé sur une adaptation déterministe de la matrice de covariance de la distribution gaussienne (cf Section 4.8).

3.3.5.5.3 LES ALGORITHMES GÉNÉTIQUES (GA, JOHN HOLLAND, 1973-1975)

Les algorithmes génétiques sont les plus populaires des AE. Proposés par J. Holland [18], et popularisés par son élève D.E. Goldberg [14], ils ont été imaginés initialement comme des outils de modélisation de l'adaptation, et non comme outils d'optimisation, d'où un certain nombre de malentendus [20]. Ils travaillent dans l'espace des chaînes de bits avec les moteurs GGA et SSGA. Ils différencient explicitement le génotype du phénotype, le génotype étant généralement codé de façon binaire. Le choix du codage du génotype (la façon dont il est relié au phénotype) est crucial pour un algorithme génétique. Classiquement, ils utilisent un opérateur de sélection proportionnel, un remplacement générationnel, et l'opérateur de croisement est l'opérateur principal. Des AE utilisant d'autres représentations et opérateurs sont souvent appelés *algorithmes génétiques*, bien que les spécialistes évitent cet abus de langage.

3.3.5.5.4 LA PROGRAMMATION GÉNÉTIQUE (JOHN KOZA, 1992).

Apparue initialement comme sous-domaine des GA, et amenée à maturité par J. Koza [19, 20] en Californie, la programmation génétique (GP) s'intéresse spécifiquement à la construction automatique de programmes et peut être vue comme l'évolution artificielle de programmes représentés sous forme d'arbres (il existe aussi des variantes de GP qui utilisent une représentation linéaire des programmes). Elle constitue aujourd'hui une des branches les plus actives des AE.

On suppose que le langage dans lequel on décrit les programmes est constitué d'opérateurs et d'opérandes de base, tout opérateur pouvant opérer sur un nombre fixe d'opérandes, et rendant lui-même un résultat pouvant à son tour être l'opérande d'un des opérateurs. L'ensemble des nœuds de l'arbre est l'ensemble des opérateurs, et l'ensemble des terminaux de l'arbre est constitué des opérandes de base. Les premiers travaux en GP optimisaient des programmes écrits dans un sous-ensemble du langage LISP travaillant sur des variables booléennes. Les nœuds étaient constitués d'opérations logiques (AND, OR, ...) et de tests (ex : l'opérateur ternaire IF Arg1 THEN Arg2 ELSE Arg3), et les opérandes des variables du problème. De nombreux autres langages ont été utilisés dans le cadre de GP, mais donnons ici l'exemple trivial de programmes opérant sur des valeurs réelles, avec pour terminaux soit des valeurs constantes, soit l'un des symboles X etY ({X,Y,R}), et pour nœuds les opérations d'addition et de multiplication ($\{+, *\}$). L'ensemble des programmes que décrivent de tels arbres est l'ensemble des polynômes réels à 2 variables X etY. De même qu'en programmation manuelle, il est possible et souhaitable d'utiliser les concepts de programmation structurée : la notion de sous-routine par exemple a été introduite rapidement dans les arbres sous la forme d'ADF (Automatically Defined Functions [24]) de même que des structures de contrôle au sein des opérateurs élémentaires (boucles, récursion,...).

L'intérêt d'une telle représentation, qui permet d'utiliser les principes évolutionnaires sur ce type d'espace de recherche, est la fermeture syntaxique de l'opérateur de croisement : en effet, alors qu'il est difficile d'imaginer croiser deux programmes séquentiels écrits dans un langage de haut niveau (pensez à du C ou du Java) en obtenant un programme valable comme résultat du croisement, le croisement d'arbres ne pose aucun problème, et donne toujours un arbre représentant un programme valide.

GP utilise le même algorithme de base que les algorithmes génétiques, et les moteurs d'évolution convoqués sont souvent de type SSGA, mais avec des tailles de population énormes, justifiant leur parallélisation systématique sur grappes de stations. Ainsi, les résultats les plus spectaculaires obtenus par Koza l'ont été avec des populations de plusieurs centaines de milliers d'individus, utilisant le *modèle en îlots* (une population par processeur, avec migration régulière des meilleurs individus entre processeurs voisins).

3.3.5.5.5 LES ALGORITHMES À ESTIMATION DE DISTRIBUTION (EDA,

MÜHLENBEIN ET PAASS [6], 1996)

Bien que les EDA ne soient pas classés aujourd'hui parmi les AE les plus efficaces en moyenne [50], leur intérêt théorique est grand [51], car ils permettent de situer l'optimisation évolutionnaire par rapport à d'autres approches de l'optimisation globale comme l'*optimisation stochastique* et l'*optimisation Bayésienne*. De par la place centrale du côté probabiliste, l'estimation de distribution partage aussi de nombreux points communs avec les stratégies d'évolution et les algorithmes de colonies de fourmis. Mais on peut également pointer des similarités avec le *recuit simulé* (qui utilise la fonction objectif comme distribution de probabilité pour construire un échantillon) et les algorithmes génétiques, dont les EDA utilisent les opérateurs de sélection.

En pratique, les EDA sont utilisés pour résoudre des problèmes d'optimisation, via la manipulation d'un échantillonnage de la fonction objectif. Comme toutes les méta-heuristiques utilisant une population de points, ils sont itératifs. Mais, contrairement aux AE « classiques », leur principe consiste à estimer les relations entre les différentes variables du problème, grâce à l'estimation d'une distribution de probabilité M associée à chaque série de points de l'échantillon pour l'itération en cours. Ce principe fait implicitement l'hypothèse qu'une grande partie de Ω a été explorée, ce qui est irréaliste ou très coûteux dès les moyennes dimensions ($n > 4$ environ). Ils n'emploient pas d'opérateurs de croisement ou de mutation, l'échantillon étant directement construit à partir des paramètres de distribution, estimés à l'itération précédente. Ils construisent un modèle probabiliste (tout l'enjeu est là) à partir de plusieurs solutions, puis en sélectionnent des nouvelles au sein de ce modèle (figure 4).

Cependant, la densité de probabilité n'est qu'une photographie statique de ce que l'on sait de Ω à l'instant t. Elle n'encourage pas l'exploration de nouvelles régions, sinon avec de faibles probabilités (queues de distributions). Les optimiseurs efficaces, tels que les ES adaptatifs, ne prétendent pas estimer une densité de présence en tout point de Ω. En exploitant la dynamique des populations sur plusieurs itérations, ils peuvent, par exemple, « allonger la foulée » dans des directions où les derniers déplacements se sont avérés favorables.

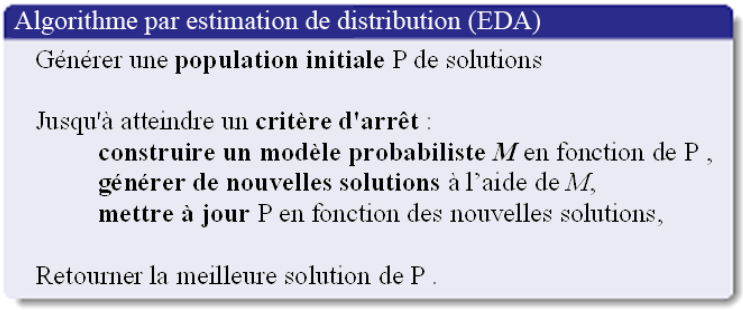

Algorithme par estimation de distribution (EDA)
Générer une **population initiale** P de solutions
Jusqu'à atteindre un **critère d'arrêt** :
construire un modèle probabiliste *M* en fonction de P ,
générer de nouvelles solutions à l'aide de *M*,
mettre à jour P en fonction des nouvelles solutions,
Retourner la meilleure solution de P .

Figure 22. Algorithme par estimation de distribution (EDA).

3.3.5.5.6 LES ALGORITHMES À ÉVOLUTION DIFFÉRENTIELLE (PRICE ET STORN [7], 1995)

L'évolution différentielle est l'un des AE qui a connu un grand développement ces dernières années, surtout dans l'industrie, et c'est l'un des sujets actuels les plus brûlants dans la recherche en intelligence informatique [8, 9]. Il s'agit d'une méta-heuristique stochastique d'optimisation des fonctions multidimensionnelles, conçue à l'origine pour les problèmes continus et sans contraintes. Ses extensions peuvent traiter les problèmes à variables mixtes [9] et gèrent les contraintes non linéaires. L'évolution différentielle est inspirée par les algorithmes génétiques et les stratégies évolutionnistes, combinées avec une technique géométrique de recherche. Les algorithmes génétiques changent la structure des individus en utilisant la mutation et le croisement, alors que les stratégies évolutionnistes réalisent l'auto-adaptation par une manipulation géométrique des individus. Ces idées ont été mises en œuvre grâce à une opération

de mutation sur des vecteurs [7] comparable à une sorte de « tetra-crossover » qui apporte une large perturbation. Ces dix dernières années, l'évolution différentielle est devenue une méthode incontournable pour résoudre une grande quantité de problèmes scientifiques et industriels : ordonnancement de tâches d'un satellite, registration et traitement d'image, contrôle optimal multimodal, optimisation de processus chimiques, décision multicritère, entraînement des réseaux de neurones, ajustement de fonctions floues, conception en aérodynamique, approximation polynomiale.

3.3.5.6 OPÉRATEURS DE VARIATION

Les composantes de l'algorithme qui dépendent intimement de la représentation choisie sont d'une part l'*initialisation*, i.e. le choix de la population initiale, dont le principe général est d'échantillonner le plus uniformément possible l'espace de recherche Ω, dans l'optique d'optimisation globale, et d'autre part les *opérateurs de variation*, qui créent de nouveaux individus à partir des parents sélectionnés. On distingue les opérateurs de *croisement* (binaires, ou plus généralement n-aires) et les opérateurs de *mutation*, unaires.

• L'idée générale du croisement est l'échange de matériel génétique entre les parents : si deux parents sont plus performants que la moyenne, on peut espérer que cela est dû à certaines parties de leur génotype, et que, certains enfants, recevant les "bonnes" parties de leurs deux parents, n'en seront que plus performants. Ce raisonnement, trivialement valable pour des fonctions performance linéaires sur des espaces de recherches réels par exemple, est extrapolé (et expérimentalement vérifié) à une classe plus étendue de fonctions, sans que les résultats théoriques aujourd'hui disponibles ne permettent de délimiter précisément la classe de fonctions pour laquelle le croisement est utile. On adopte donc une approche pragmatique : on tente de définir un croisement en accord avec le problème traité et on le valide expérimentalement [58].

• L'idée directrice de la mutation est de permettre de visiter tout l'espace. Les quelques résultats théoriques de convergence des AE ont d'ailleurs tous comme condition la quasi-ergodicité de la mutation, c'est-à-dire le fait que tout point de l'espace de recherche puisse être atteint en un nombre fini de mutations. Mais la mutation doit également pouvoir être utile à l'ajustement fin de la solution : d'où l'idée d'une mutation de « force », réglable éventuellement au cours de l'algorithme lui-même (voir section 4.8).

Il a été montré que les représentations chromosomiques qui contiennent l'information en double (diploïdie) permettent de rendre les algorithmes plus robustes face aux mutations, particulièrement en environnement dynamique, grâce à cette redondance d'information qui lui donne une sorte de «mémoire» à long terme (principe analogue à la double hélice de l'ADN).

Application des opérateurs de variation

Tous les opérateurs de variation ne sont pas appliqués systématiquement à tous les individus à chaque génération. Le schéma le plus courant est d'appliquer séquentiellement un opérateur de croisement, puis un opérateur de mutation, chacun avec une probabilité donnée (paramètres respectifs p_c et p_m , laissés au choix de l'utilisateur).

Il est par contre relativement fréquent de disposer de plusieurs opérateurs de chaque type (croisement ou mutation) et de vouloir les utiliser au sein du même algorithme (ex : le croisement par échange de coordonnées et le croisement barycentrique dans le cas de l'optimisation réelle). Il faut alors introduire de nouveaux paramètres, à savoir l'importance relative de chaque opérateur par rapport aux autres (ex : on veut faire 40% de croisements par échange de coordonnées, et 60% de croisement barycentriques, voir section 4.8). Il est bien sûr possible d'imaginer d'autres schémas d'application des opérateurs de variation, ainsi d'ailleurs que d'autres types d'opérateurs, ni unaires ni binaires (alors appelés opérateurs d'orgie !).

Nous allons maintenant donner deux exemples d'espaces de recherche parmi les plus utilisés – et détaillerons pour chacun les composantes de l'algorithme qui dépendent de la représentation. Il ne faut toutefois pas perdre de vue que la puissance des AE vient de leur capacité à optimiser des fonctions définies sur des espaces de recherche bien plus variés que ces deux-là.

3.3.5.7 LES CHAÎNES BINAIRES

L'espace de recherche est ici $\Omega = \{0,1\}^N$ (espace des *bitstring* en anglais). Historiquement (voir Section 4.5) il s'agit de la représentation utilisée par l'école des algorithmes génétiques, et la justification de l'utilisation intensive de cet espace de recherche particulier était fondé à la fois sur un parallèle encore plus précis avec la biologie (une chaîne de bits étant assimilée à un chromosome) et sur des considérations théoriques qui ne seront pas détaillées ici (voir [9], ainsi que les références de la Section 4.5 à ce sujet). Ce contexte reste toutefois utilisé dans certains domaines – mais il permet surtout une présentation aisée des diverses composantes de l'algorithme.

3.3.5.7.1 INITIALISATION

Dans le cadre des chaînes de bits, il est possible tirer les individus de la population initiale uniformément sur l'espace Ω : chaque bit de chaque individu est tiré égal à 0 ou à 1 avec une probabilité de 1/2.

3.3.5.7.2 CROISEMENT

Plusieurs opérateurs de croisement ont été proposés, qui tous échangent des bits (à position fixée) entre les parents. Le schéma suivant donne l'exemple du croisement à 1 point, où l'entier l est tiré uniformément dans [1, N−1], et les deux moitiés des chromosomes sont échangées :

$$\left.\begin{array}{l}(b_1,\ldots,b_N)\\(c_1,\ldots,c_N)\end{array}\right\} \xrightarrow{P_c} \left\{\begin{array}{l}(b_1,\ldots,b_l,c_{l+1},\ldots,c_N)\\(c_1,\ldots,c_l,b_{l+1},\ldots,b_N)\end{array}\right.$$

Un autre type de croisement, appelé croisement uniforme, consiste à tirer indépendamment pour chaque position (avec une probabilité de ½) de quel parent provient le bit correspondant chez chaque enfant. Si l'on ne connaît pas les interdépendances entre les gènes (épistasie), un croisement monopoint est moins « disruptif » qu'un croisement multipoints.

3.3.5.7.3 MUTATION

Les opérateurs de mutation de chaînes de bits modifient tous aléatoirement certains bits. Le plus fréquent, appelé *bit-flip*, consiste à inverser chaque bit de l'individu muté indépendamment avec une petite probabilité p :

$$(b_1,b_2,\ldots,b_N) \xrightarrow{p_m} (b_1,b_2,\ldots,1-b_l,b_{l+1},\ldots,b_N)$$

Une autre possibilité est de prédéfinir un nombre k de bits à modifier, de choisir ensuite au hasard k positions dans l'individu et d'inverser les bits correspondants : c'est le croisement multi-points. Si k s'étend à la taille du génome, on parle alors de croisement uniforme, qui est souvent utilisé en phase d'exploration intense, mais est très disruptif. Il est donc fortement déconseillé en phase de convergence (domaine d'exploitation par l'opérateur de croisement).

3.3.5.8 LES VECTEURS DE RÉELS

Ils constituent le cas le plus fréquent en calcul numérique et sont principalement utilisés en optimisation paramétrique avec les stratégies d'évolution, dont les plus performantes à l'heure actuelle (comme CMA-ES [18]) adaptent automatiquement leur opérateur de mutation en tenant compte du paysage de la fitness. L'étude théorique de tels algorithmes se concentre essentiellement sur la fonction de fitness. La sélection des individus est déterministe. Les mutations suivent en général une loi gaussienne dont les paramètres font partie du génotype.

3.3.5.8.1 INITIALISATION

Ω est un sous-ensemble borné ou non de R^n, qui est l'espace vectoriel des réels de dimension n. Si Ω = Π [ai, bi] (produit cartésien de n intervalles bornés), on tire en général uniformément chaque coordonnée dans l'intervalle correspondant. Par contre, si Ω n'est pas borné, il faut faire des choix. On pourra soit utiliser un sous-ensemble borné de Ω et effectuer un choix uniforme dans cet ensemble, soit par exemple tirer mantisses et exposants uniformément dans des intervalles bien choisis. Bien entendu, on pourrait dire que les nombres réels représentés en machine sont de toute façon bornés – mais il est néanmoins généralement préférable de distinguer les deux cas.

3.3.5.8.2 CROISEMENT

On peut bien entendu appliquer des opérateurs d'échange de coordonnées comme dans le cas des chaînes de bits. Mais on peut également – et c'est en général bien plus efficace – "mélanger" les deux parents par combinaison linéaire. On parle alors de *croisement arithmétique* uniforme ou spécifique à chaque bit (ou série de bits) :

$$(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) \xrightarrow{p_c} \alpha\mathbf{X} + (1-\alpha)\mathbf{Y}, \alpha = U[0,1]$$

ou

$$(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) \xrightarrow{p_c} (\alpha_i X_i + (1-\alpha_i)Y_i)_{i=1\ldots n}, \alpha_i = U[0,1], \text{ indépendants}$$

La première version revient à choisir l'enfant uniformément sur le segment [XY], alors que la deuxième revient à tirer l'enfant uniformément sur l'hypercube dont [XY] est une diagonale. On remarque que l'échange de coordonnées revient à choisir comme enfant un des sommets de cet hypercube. Signalons qu'on peut également choisir les coefficients des combinaisons linéaires dans un intervalle plus grand (ex : [−0.5,1.5]) afin d'éviter la contractance de l'opérateur de croisement, source de perte de diversité génétique (voir Section 4.1.4).

3.3.5.8.3 MUTATION

La mutation est le seul garant de la globalité de la recherche : c'est le principal opérateur d'exploration. Toutefois, lorsque l'opérateur de mutation a une "force" variable (comme c'est le cas pour l'opérateur de mutation gaussienne auto-adaptatif décrit en annexe), la mutation peut aussi être l'opérateur d'exploitation. Dans le cadre de l'optimisation paramétrique avec des nombres réels, la mutation la plus employée est la mutation gaussienne, qui consiste à rajouter un bruit gaussien au vecteur des variables que l'on désire muter. La forme la plus générale est alors

$$X \rightarrow X + \sigma.N(0, C) \qquad (1)$$

où σ est un paramètre positif appelé le *pas de la mutation*, et N(0, C) représente un tirage de *loi normale centrée* de matrice de covariance C (symétrique définie positive). Tout l'art est alors bien sûr dans le choix des paramètres σ et C. L'influence de σ est intuitive : des grandes valeurs résulteront une exploration importante, et des petites une exploitation importante. On peut évidemment demander à l'utilisateur de fixer cette valeur. Mais il est clair – et des études théoriques sur des fonctions simples l'ont démontré – que cette valeur devrait décroître au fil des générations en fonction de l'avancement de la recherche, et il est impossible de fixer a priori un schéma de décroissance qui soit synchrone avec l'éventuelle convergence de l'algorithme, pour

une fonction quelconque.

La première approche adaptative, c'est-à-dire dans laquelle la décision est prise dans le contexte de la situation courante, fut la célèbre règle des 1/5 de Ingo Rechenberg [14] : soit τ la proportion de mutations réussies (c'est-à-dire pour lesquelles la fitness de l'enfant a été meilleure que celle du parent) dans les T dernières générations. On peut montrer rigoureusement que, sur la fonction "sphère" (minimisation de la norme du vecteur X), le réglage optimal de la mutation correspond à une proportion d'environ 0.2, et varie inversement proportionnellement à σ [15]. On en déduit par extrapolation à toute fonction qu'il faut augmenter σ si τ est trop grand, et le diminuer dans le cas inverse. Cette règle est facilement mise en défaut sur des fonctions ayant de nombreux optima locaux, car elle ne prend pas en compte les caractéristiques locales du paysage de fitness, du fait notamment que la même valeur de σ est utilisée pour toute la population, et pour toutes les composantes du génotype. Quoi qu'il en soit, bien que plus du tout utilisée aujourd'hui, elle n'en fut pas moins une étape importante dans l'évolution de la pratique des ES.

Pour pallier ces défauts, et plus généralement pour se débarrasser élégamment de la tâche fastidieuse du réglage des paramètres de la mutation, les pères des stratégies d'évolution, I. Rechenberg et H.P. Schwefel ont alors proposé de rendre la mutation auto-adaptative. Nous renvoyons le lecteur en annexe pour un développement mathématique plus approfondi.

3.3.5.8.4 CMA-ES : RETOUR À L'ADAPTATION DÉTERMINISTE

Mais même lorsque l'auto-adaptation fonctionne, elle fonctionne lentement : si le pas initial n'est pas proportionnel à la distance à l'optimum, dans le cas simple de la mutation isotrope, il faut un certain nombre de générations avant qu'il le devienne et que l'algorithme devienne efficace.

C'est cette observation qui a conduit Hansen et Ostermeier à proposer une méthode déterministe d'adaptation du pas σ [52], puis de l'ensemble des paramètres de la mutation gaussienne [53], revenant ainsi à une méthode adaptative d'ajustement des paramètres de la mutation. Pour en donner une idée intuitive (on ne développera pas l'aspect mathématique, hors du champ de cette revue) : si deux mutations réussies successives sont allées dans la même direction, il faut probablement agrandir le pas pour aller plus vite. Finalement, la méthode complète, appelée CMA-ES (Covariance Matrix Adaptation) fut proposée et surtout étudiée en profondeur (et ses paramètres par défaut soigneusement réglés) dans [54]. Enfin, une amélioration pour la mise à jour de la matrice de covariance en grande dimension fut proposée dans [55], et une variante pour l'optimisation multi-objectifs a été proposée dans [56].

Aujourd'hui, CMA-ES est sans contestation possible la meilleure méthode évolutionnaire pour l'*optimisation paramétrique continue*. Elle a en particulier été grand vainqueur sur les méthodes stochastiques (autres ES, évolution différentielle et EDA) pour l'ensemble de la compétition organisée lors de la conférence CEC'2005 (session « real-parameter optimization »).

En conclusion, les méthodes auto-adaptatives sont efficaces quand elles sont applicables, c'est-à-dire lorsque la sélection, qui n'utilise que la performance, élimine les mauvais paramètres avec les mauvais individus. Elles sont alors plus performantes que les méthodes statiques ou adaptatives de base, car elles tiennent compte de l'inter-corrélation entre les gènes.

3.3.5.9 HYBRIDATION

Un algorithme évolutionnaire hybridé avec une heuristique (ex : recherche locale) est désigné sous le terme d'algorithme mémétique [29, 57]. Le couplage « AE-heuristiques locales » prend typiquement trois formes. L'heuristique peut être utilisée pour introduire des bons points de départ dans la population initiale. Elle peut également être ajoutée aux opérateurs de mutation.

Enfin, elle peut améliorer les meilleurs individus de la dernière population.

Les modèles d'évolution lamarckien et baldwinien peuvent être considérés comme des méthodes hybrides d'optimisation darwinienne, combinant une approche génétique et une optimisation par recherche locale, pour trouver plus rapidement les optima locaux. On peut ainsi faire l'analogie avec les rôles respectifs de l'adaptation (l'AE) et l'apprentissage (l'heuristique) dans les espèces vivantes. Par exemple, si l'on ré-injecte les individus améliorés dans la population, c'est du lamarckisme. Paradoxalement – on a vu que dans la nature les choses ne se passent pas ainsi – cette méthode fonctionne très bien notamment pour les problèmes combinatoires : les meilleurs résultats sur le problème du « voyageur de commerce » ont été obtenus de cette manière [28]. Le baldwinisme, quant à lui, est implémenté dans un AE en améliorant l'individu grâce à une méthode locale, en évaluant alors sa fitness après modification, mais en laissant son génome intact.

Différentes études ont été menées sur ces trois approches, afin de les comparer du point de vue de l'efficacité. L'approche darwinienne pure, bien qu'étant la plus utilisée, est généralement moins efficace que les deux autres, qui sont sensiblement équivalentes bien qu'il existe des différences selon les applications [25]. Ainsi, l'évolution lamarckienne permet une convergence plus rapide que l'évolution darwinienne, mais le risque d'être bloqué dans un optimum local est plus important. Dans l'évolution baldwinienne, un individu qui peut potentiellement amener à une bonne solution à plus de chance d'être choisi, et cette approche évite une convergence précipitée vers un optimum local (l'évaluation des individus après une recherche locale a pour effet un lissage de la fonction d'évaluation ce qui rend plus facile la recherche de bonnes solutions).

On retiendra que les AE standards ne sont pas suffisamment compétitifs, et qu'une étape d'hybridation est requise dès que l'on souhaite obtenir des résultats plus performants.

Il est aussi possible de faire « plus » que de l'optimisation numérique ou fonctionnelle grâce au darwinisme artificiel dont les principes d'évolution simulée peuvent être exploités de façon très variée : approches co-évolutionnaires « parisiennes », AE interactifs, évolution de second ordre.

3.3.5.10 APPROCHE CO-ÉVOLUTIONNAIRE PARISIENNE

L'approche standard en évolution artificielle vise à faire converger le ou les meilleurs individus d'une population vers l'optimal désiré. Parfois, cette approche est une perte de temps et d'efficacité, car on élimine souvent des individus encore porteurs d'importantes informations sur la structure de l'espace de recherche. Or, dans la nature, la majorité des individus produits sont conservés, et sont capables d'évoluer simultanément. Cette observation a conduit en 2001 le groupe Fractales de l'INRIA à utiliser des techniques stochastiques dites de « sharing » ou « niching » [19] pour obtenir plus que le simple fait de guider un individu isolé vers un optimal global [59].

L'évolution parisienne [47] est une technique qui consiste à formuler la résolution d'un problème, non plus comme la recherche d'un optimum par une population de points dans un espace de recherche, mais comme la recherche d'un état d'équilibre d'une population de « segments » de solution, qui collaborent globalement pour constituer la solution recherchée. Les individus ne correspondent plus individuellement mais communautairement à une solution potentielle au problème posé. La population est une société qui construit en commun la solution recherchée : c'est une co-évolution.

Il n'est pas toujours possible de formuler tous les problèmes d'optimisation de façon compatible

avec cette approche (il faut au minimum pouvoir séparer le problème en sous-problèmes interdépendants), mais quand cela est possible, le gain en efficacité est important. Des applications récentes ont concerné le problème inverse pour les IFS, la stéréovision pour la détection d'obstacles (algorithme des « mouches »), la compression fractale, et le text-mining. De façon schématique, les AE Parisiens ont toutes les composantes des AE classiques plus :

deux fonctions de fitness : une fonction globale qui est calculée sur l'ensemble de la population, ou sur une proportion de celle-ci (par exemple à la suite d'un processus de clusterisation, ou d'élimination des individus trop mauvais), et une fonction locale calculée sur chaque individu, qui mesure la proportion avec laquelle cet individu contribue à la solution globale ;

un processus de redistribution qui répartit à chaque génération la fitness global sur les individus ayant contribué à la solution (approche Michigan [48]),

un mécanisme de maintien de la diversité, afin d'éviter les modes dégénérés où tous les individus sont concentrés sur la même zone de l'espace de recherche.

3.3.5.11 ALGORITHMES GÉNÉTIQUES INTERACTIFS

Dans le cas où l'on ne sait pas précisément définir ce que l'on souhaite optimiser, il est nécessaire de développer des stratégies spécifiques. C'est le cas, on l'a vu, pour les techniques d'optimisation multi-critères. Le problème se complique encore lorsqu'on se trouve dans des cas où ce que l'on souhaite optimiser n'est pas évaluable ou mesurable à l'aide d'une fonction mathématique (par exemple la simple notion de « satisfaction ») : il s'agit alors de faire intervenir un utilisateur humain dans la boucle évolutionnaire. Cela correspond au courant des algorithmes évolutionnaires interactifs ou AE-I [47] ou encore des HBGA (human-based genetic algorithm) qui autorisent un apprentissage implicite à partir des divers choix de l'utilisateur, à quelque niveau que ce soit (initialisation, mutation, crossover, sélection,...).

Si les premiers travaux sur l'évolution interactive concernaient la création musicale et la synthèse d'images numériques, de nouvelles applications concernent le text-mining et le e-learning. De nombreuses études touchent maintenant divers domaines d'application, où les quantités à optimiser sont liées à des jugements subjectifs (visuels ou auditifs le plus souvent).

Définir les AE-I comme des AE dont la fonction de fitness est donnée par une interaction humaine ne suffit pas à représenter la variété des applications existantes. Il faut en fait définir l'interaction de façon plus large. Les fonctions de fitness peuvent n'être établies que partiellement par interaction. Des interventions de l'utilisateur directement au niveau des génomes, des opérateurs génétiques, des paramètres et des diverses stratégies peuvent être envisagées. Ainsi, il semble actuellement mieux adapté de considérer les AE-I comme des processus évolutionnaires contraints par une interaction avec un utilisateur humain, voir un groupe d'utilisateurs.

En outre, si l'on cherche à « optimiser la satisfaction » de l'utilisateur, ce qui est l'approche la plus classique, des considérations de « fatigabilité » interviennent, ce qui impose d'éviter des interactions répétitives, ennuyeuses ou mal perçues de l'utilisateur, de développer des mécanismes d'interrogation efficaces (une phase d'apprentissage, par exemple), et divers modes d'interaction-utilisateur. Les techniques usuelles sont de réduire la taille des populations et du nombre de générations, et de choisir des modèles spécifiques pour contraindre la recherche dans des zones a priori intéressantes de l'espace de recherche, de faire de l'apprentissage automatique (fondé sur un nombre limité de quantités caractéristiques) afin de proposer une pré notation automatique des individus et de ne présenter à l'interaction que les individus les plus intéressants de la population, en considérant les votes antérieurs de l'utilisateur [65].

Autoriser des interactions directes au niveau phénotypique (Baldwinisme et Lamarkisme) représente un pas de plus vers l'utilisation efficace d'un EA-I par exemple dans le cadre artistique, à partir du moment où il est possible pour l'utilisateur d'avoir des intuitions sur des composantes partielles de la solution idélae, ou de pouvoir faire interactivement de l'optimisation « locale ».

Mais des questions de mise en œuvre se posent dans le cadre de la créativité assistée avec des AE-I, concernant l'intégration du geste créateur de l'utilisateur dans la dynamique algorithmique propre au mécanisme évolutionnaire. Nous renvoyons le lecteur au §5.5.3 pour de plus amples détails.

3.3.5.12 ÉVOLUTION STRUCTURELLE OU DE SECOND ORDRE : LES MODÈLES AEVOL ET RBF-GENE

On parle d'évolution de second ordre (ou de sélection indirecte) lorsque les individus sont sélectionnés non pour leur seule adaptation à un environnement mais aussi pour leur évolvabilité, c'est-à-dire leur capacité à évoluer « mieux » ultérieurement. Dans la nature, des mécanismes évolutifs ont structuré le génome, en le laissant utiliser des degrés de liberté dans le codage et le placement de gènes le long des chromosomes. Et des chercheurs ont montré qu'une structure génique dynamique permet cette évolution de second ordre.

AEVOL est l'un des premiers modèles d'évolution expérimentale in-silico (ou évolution artificielle), développé par l'équipe de G.Beslon au LIRIS de Lyon [31]. Les organismes y sont décrits par trois niveaux d'organisation : le génome (séquence circulaire double brin), le protéome (collection d'éléments fonctionnels traduits des séquences géniques) et le phénotype (capacités fonctionnelles).

Même si elle ne modifie pas dans un premier temps leur fitness, il semble évident qu'à fitness égale, la structure génétique d'un individu va influer sur sa robustesse et sa variabilité (capacité à muter efficacement, c'est-à-dire que les mutations doivent avoir un impact suffisant sur l'adaptation des individus). En effet, si un individu reproduit plus fidèlement son génotype qu'un autre, ses descendants auront plus de chance de conserver ses avantages acquis (robustesse). Pour qu'une lignée perdure, elle doit arriver à un équilibre entre robustesse et variabilité.

Les auteurs montrent qu'une sélection de second ordre est bien à l'œuvre dans l'algorithme et qu'elle permet de façonner les génomes, en modifiant les tailles des zones non codantes, le nombre et l'ordre des gènes (chose inhabituelle avec les GA classiques). De fait, la structure génétique étant variable, on peut utiliser des mécanismes mutationnels plus variés que ceux qui sont convoqués au sein des GA habituels : les réarrangements. L'évolution des individus s'accompagne de profondes mutations dans la structure de leur génome (nombre de gènes, variations de taille du génome, taille des séquences non-codantes), qui passe par des phases d'expansion, puis de compression, et enfin de stabilisation, avec amélioration des performances.

Le modèle Aevol a permis de comprendre certains résultats importants liés à l'évolution de second-ordre :

- la régulation du nombre de descendants neutres : la probabilité de reproduction à l'identique est constante, quel que soit le taux de mutation ;
- l'évolution avec degrés de liberté dans l'organisation structurelle du génome ajuste la variabilité des individus, en compromis judicieux avec leur robustesse ;

pour maintenir un niveau de variabilité constant, l'évolution sélectionne indirectement des génomes plus ou moins compacts ;

une loi de puissance émerge dans Aevol entre le nombre de bases non-codantes (ou le nombre de gènes) et le taux de mutation spontané. Cette loi explique comment les organismes parviennent à maintenir un taux de

reproduction neutre constant.

Bien qu'un tel mécanisme soit a priori très intéressant en évolution artificielle, la structure des AE interdit généralement celui-ci car les processus évolutifs sont figés. Guillaume Beslon et Virginie Lefort ont proposé en 2007, à des fins d'optimisation, un AE, RBF-Gene [30], exploitant les caractéristiques évolutives observées dans Aevol. Il possède, comme Aevol, un niveau intermédiaire entre le phénotype et le génotype : le protéome, ensemble de « protéines » permettant de faire varier la structure du génome sans modifier le phénotype, sachant que ces variations auront une influence sur les reproductions futures. Ce deuxième niveau assure la calculabilité du phénotype quelque soit la structure du génome. Les auteurs parlent « d'algorithme évolutionnaire incarné », pour signifier la pleine concordance avec les mécanismes biologiques. L'AE est alors capable d'adapter sa complexité pour répondre aux conditions environnementales.

3.3.5.13 DOMAINE D'APPLICATION DES AE

La conception évolutionnaire est appliquée avec succès depuis vingt ans dans des domaines aussi divers que l'industrie (optimisation de structures mécaniques, de profils d'ailes d'avion, de tuyères de réacteurs, de processus chimiques, optimisation des allocations de ressources, programmation de robots…), l'économie et la finance (simulation d'économies artificielles, optimisation de portefeuilles bancaires), l'architecture et le bâtiment (conception de formes et d'objets, recherche de plans, optimisation structurelle [2] ou énergétique du bâtiment - acoustique, thermique - modélisation déclarative de scènes, génération de formes « complexes » en architecture, aménagement d'intérieurs).

Plus encore, des environnements de programmation dédiés, destinés à faciliter l'appropriation de ces méthodes par les non-spécialistes ont été développés, notamment en France avec :

● le langage EASEA [10], produit phare de la recherche de ces dix dernières années, qui supporte actuellement le développement parallèle sur GPU [27], est disponible sur http://sourceforge.net/projects/easea.

● Generic Evolutionary Algorithm Library (GEAL – http://dpt-info.u-strasbg.fr/~blansche/fr/geal.html), qui est une bibliothèque JAVA permettant de créer facilement des AE. Elle est développée par Alexandre Blansché [25] au LsiiT de l'Université Louis Pasteur de Strasbourg .

● OPT4J : un programme écrit en Java pour appliquer des algorithmes d'optimisation à objectifs multiples, comme un AE (SPEA2 et NSGA2), un optimiseur d'essaim de particules, une évolution différentielle, ou un recuit simulé aux problèmes arbitraires d'optimisation.

● EO - Evolutionary Computation Framework, disponible sur http://eodev.sourceforge.net/, est une libraire écrite en C++ pour Linux, MacOS, Windows, manipulant de nombreux EA et opérateurs utiles au développement d'applicatifs évolutionnaires, mais ne gère pas le multi-objectif. Pour ce faire, il convient d'installer la sur-couche **Paradiseo-MOEO, développée pas l'INRIA, et disponible sur** http://paradiseo.gforge.inria.fr**.**

3.3.5.14 DIFFÉRENCES ENTRE ÉVOLUTION NATURELLE ET ÉVOLUTION ARTIFICIELLE

L'évolution artificielle n'est pas l'évolution biologique, car elle manipule des objets ou des structures non vivantes, et travaille dans un temps très court. De plus, elle fonctionne généralement avec une structure génomique figée, bien pratique pour les calculs et la

correspondance directe génotype—phénotype, alors que la seconde utilise un niveau intermédiaire fondamental pour la morphogenèse : le protéome, ou espace des protéines.

Dans l'évolution des systèmes biologiques, il n'a pas de fonction de fitness, aussi surprenant que cela puisse paraître ! La nature se contente de produire des descendants. La régulation vient à la fois des événements extérieurs (qui définissent les contraintes d'adaptation, de sélection et de symbiose), de la phylogénie, et de la morphogenèse qui est soutenue par des logiques complexes internes aux génomes qui nous échappent encore. Par contre, en évolution artificielle, on est quasiment obligé de définir des fonctions de fitness, à partir du moment où l'on s'intéresse à des mesures dans l'espace phénotypique (la performance, entre autres).

Mais tous les problèmes d'évolution ne se ramènent pas à de l'optimisation. Un bâtiment, une ville, n'évoluent pas au sens darwinien : ils ne se reproduisent pas, ne possèdent pas de principe de variation (mutation / sélection) autre que causal. Par exemple, d'un point de vue purement fonctionnel, l'analogie métabolique du corps semble mieux appropriée pour eux : ils doivent amener de l'énergie et des nutriments à l'ensemble de leurs parties (mécanisme de distribution contraint par la topologie du corps).

3.3.5.15 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les AE sont de plus en plus utilisés en optimisation numérique, lorsque les fonctions à optimiser sont complexes, de forte dimensionnalité, irrégulières, mal connues, ou en optimisation combinatoire, pour des problèmes de théorie des graphes (voyageur de commerce, coloration de graphes), de séquencement de tâches, répartition de ressources, d'emploi du temps, du sac à dos. Leur « résolution efficace » est fondée le plus souvent sur une hybridation avec des techniques « classiques ».

Faciliter le réglage des paramètres est un des enjeux des recherches théoriques actuelles sur les AE : les travaux récents, essentiellement en ce qui concerne l'étude de la convergence de ces algorithmes (modélisations Markoviennes), ont permis de poser des bases plus solides pour ces techniques, souvent critiquées à cause de leur aspect « empirique. » Ces approches fournissent un cadre théorique riche, qui permettra non seulement de proposer des techniques d'ajustement de paramètres, mais aussi de comprendre plus finement quand et pourquoi un AE est efficace.

Le design d'algorithmes auto-adaptatifs répond aussi à ce besoin de recettes de réglage des paramètres : laisser l'évolution prendre en charge elle-même cette tâche est certainement une excellente solution, explorée par de nombreux chercheurs du courant « stratégies d'évolution » [49], si l'on prend bien garde de ne pas alourdir trop l'algorithme. Comme toujours, ce choix est soumis à un compromis : les capacités adaptatives sont coûteuses, il faut les exploiter à bon escient. L'idée d'exploiter le darwinisme artificiel dans un cadre élargi, en ne se limitant plus à des tâches l'optimisation « simples », est par ailleurs un courant qui prend actuellement beaucoup d'ampleur, tout comme les travaux sur l'évolution interactive ou encore sur les liens qui unissent complexité et optimisation.

3.3.6 ALGORITHMES ÉVOLUTIONNAIRES ET CRÉATIVITÉ

3.3.6.1 AU DELÀ DU NÉO-DARWINISME ARTIFICIEL

Les récentes recherches sur l'évolution (cf. section 3.1) ne sauraient remettre en cause – pour les problèmes d'optimisation au sens large – la pertinence ou l'efficacité des algorithmes évolutionnaires inspirés du néo-darwinisme[1]. Mais il est clair qu'en matière de « morphogenèse architecturale », et puisque l'on souhaite

utiliser ces algorithmes dans le champ de la créativité, rien ne nous garantit leur pertinence. Plus précisément, le succès des AE convoqués dans de nombreux champs disciplinaires repose sur les bons résultats obtenus en optimisation, ce qui correspond analogiquement à la micro-évolution naturelle. Mais, optimiser est-ce concevoir ? Les processus de morphogenèse peuvent (et doivent le plus souvent) utiliser des phases d'optimisation, mais rien ne nous dit que seules ces phases suffisent à créer du neuf, à voir émerger des formes originales [61]. Peut-être faut-il guider le processus de morphogenèse, c'est-à-dire introduire une manière susceptible de mener à un analogue des macro-évolutions.

3.3.6.2 MORPHOGENÈSE NATURELLE ET ARTIFICIELLE

Dans la nature, on sait que toute morphogenèse ne résulte pas uniquement d'un processus d'adaptation environnementale (donc d'optimisation). Il y a aussi les lois de la chimie et de la physique qui guident et contraignent aussi l'émergence des formes, qui ne sont pas toutes possibles [35, 37]. De plus, le mécanisme morphogénétique naturel de bas niveau est bien connu : c'est le couplage division cellulaire / différenciation cellulaire. Ensuite, pour les niveaux méso et macro, les choses se compliquent, et les plus grands chercheurs actuels n'en sont qu'aux balbutiements pour expliquer la formation des tissus et des organes [39].

En architecture, on n'est pas du tout dans une approche cellulaire avec copie et différenciation, même au niveau constructif le plus élémentaire. On traite d'emblée un ensemble de composants au niveau méso ou macro, avec des principes constructifs et des règles d'assemblage. Le plan d'ensemble des objets produits n'est pas codé dans un « noyau » des briques de base : les logiques sont externes, ce sont celle du concepteur, celle des techniques de fabrication et de mise en œuvre. Et rien n'interdit de les considérer comme des entrées potentielles d'un système évolutionnaire, qui pourraient être stockées dans un chromosome dédié à cet usage... et utilisées au final dans un espace tampon entre génotype et phénotype, comme le « protéome » (section 4.12).

3.3.6.3 GÉNÉRATION DE FORMES « COMPLEXES »

Si l'on renverse la logique « top-down » (jadis hégémonique) de « form making » en privilégiant désormais la logique « bottom-up » de « form-finding » [62], on voit que cette définition permet de relier la théorie de l'optimisation des formes à celle de l'émergence dans les systèmes complexes. On passe ainsi à une architecture « performative » où la forme résulte d'un processus de design plus ou moins évolué, guidé par des critères d'optimisation en général globaux. L'architecte devient alors le designer et le contrôleur de processus génératifs, et la crainte est qu'il puisse perdre la maîtrise de la forme, si son intervention dans le mécanisme génératif est trop faible ou inexistante. L'imagination s'appliquerait dans ce cas uniquement à la conception des processus génératifs, alors que les AE-I permettent de (ré)introduire un geste créatif au sein du processus évolutionnaire. Ainsi, dans le cadre de la « conception évolutive », on peut utiliser les AE conjointement comme explorateurs et optimiseurs. Le processus d'optimisation est contrôlé par les concepteurs et le système évolutif est utilisé pour aider à l'exploration des nombreuses solutions possibles, de manière à fournir des inspirations et identifier la gamme des solutions utiles. Dans le projet EcCoGen, on va séparer plus ou moins l'acte d'optimisation environnementale (énergétique,...) et de l'acte de morphogenèse, censé produire des formes variées, si possibles nouvelles, capables de stimuler l'imaginaire créatif du concepteur humain. Ainsi, dans sa thèse [5], P.Marin sépare bien la stratégie morphogénétique de l'optimisation énergétique, même si elles ont lieu au sein d'un même processus évolutionnaire.

3.3.6.4 DIVERSITÉ ET CRÉATIVITÉ

En matière de créativité, ce n'est pas l'aléa qui est intéressant (on peut toujours guider un processus aléatoire vers un attracteur unique), c'est la diversité des solutions obtenues. Or, un reproche qui est souvent fait aux méthodes d'optimisation est qu'elles tendent à faire converger les processus vers un nombre restreint d'individus optimisés, au détriment de la diversité. Certes, ça n'est pas toujours le cas, et cela dépend en fait de deux facteurs : l'allure de l'espace de recherche (un ou plusieurs optimaux, leur répartition,...), et la nature de l'algorithme (choix mono-objectif ou multi-objectifs). En effet, en optimisation mono-critère (réelle ou agglutinée), on ne recherche les sommets ou les vallées que d'une seule fonction, tandis qu'avec une description multi-critères, l'espace de recherche conjugue plusieurs fonctions et a souvent plus de degrés de liberté, et donc plus de solutions potentielles. La diversité est donc fortement liée à la description-même du problème et à la nature des fonctions à optimiser. Elle est difficilement prédictible en général.

D'autre part, on peut considérer qu'un algorithme est créatif s'il est capable de faire évoluer à la fois la solution dans l'univers des possibles et l'espace de recherche de ces solutions (en gros, tendre plus ou moins vers l'ergodicité) [1]. Beslon appelle cette caractéristique l'*évolvabilité* du processus [44], qui caractérise les méthodes d'évolution dites de *second ordre* (section 4.12).

3.3.6.5 QUELLE MÉTHODE ÉVOLUTIONNAIRE CHOISIR ?

3.3.6.5.1 LE THÉORÈME DU « NO FREE LUNCH »

Des schémas et des arguments séduisants ont donné jusque dans les années 90 l'espoir d'obtenir des algorithmes performants en moyenne sur tous les problèmes. Mais, rapidement, les contradictions entre résultats empiriques et théorie des GA ont donné lieu à des débats sur la représentation et l'importance respective des opérateurs de croisement et mutation, le croisement étant le principal opérateur de recherche assurant la recombinaison. Au contraire, les stratégies d'évolution et la programmation évolutionnaire utilisent principalement la mutation. Les premières versions d'ES et de programmation évolutionnaire dans les années 60 et 70 ne comportaient d'ailleurs pas de croisement. De la même manière que les GA regardent la mutation comme un opérateur de réparation (ré-injection de briques élémentaires perdues du fait des erreurs d'échantillonnage dans la population), les ES considèrent le croisement comme un opérateur de réparation. Celui-ci sert à extraire les similarités des bons individus de la population pour réparer l'excès de bruit introduit par les mutations, ce qui augmente la vitesse de convergence.

Mais en 1995, un résultat théorique est venu conforter les observations selon lesquelles il n'y avait pas un AE meilleur que les autres en général, mais plutôt un AE optimal par problème : le théorème du « No Free Lunch » [60]. Wolpert et McReady montrent qu'en moyenne, sur tous les problèmes d'optimisation, le comportement de n'importe quel algorithme est le même. Ce résultat est établi sur des problèmes en variables discrètes mais de cardinalité arbitraire. L'interprétation directe du NFL est que, ce qu'un algorithme d'optimisation a gagné sur un problème (par rapport à tous les autres algorithmes) est perdu sur un autre problème. Bien entendu, il faut se garder d'interpréter naïvement le NFL en concluant qu'il est inutile d'améliorer les méthodes d'optimisation puisqu'elles ne feront jamais mieux que, par exemple, une recherche aléatoire. Ce théorème est en effet établi sous l'hypothèse que tous les problèmes d'optimisation possibles sont également probables. Mais les optimiseurs ne sont pas tous équivalents sur une classe de fonctions donnée. La recherche en optimisation, pour être pertinente, doit lier l'algorithme au problème.

3.3.6.5.2 QUEL AE CHOISIR POUR ECCOGEN ?

Alors, peut-on simplement guider nos choix, pour le projet EcCoGen, puisqu'il n'existe pas de méthode générique universelle, du moins pour l'optimisation ?

Il est déjà certain que la programmation évolutionnaire semble désormais dépassée, et

l'optimisation par estimation de distribution n'est pas performante, comme on l'a vu. De plus, la programmation génétique semble plutôt réservée à des problèmes d'informatique, dans une logique de développement et d'optimisation logiciels.

Les AE actuellement performants sont les AG et les ES - à condition de dépasser la vieille opposition entre les « algorithmes génétiques historiques » (génome binaire) et les « stratégies d'évolution historiques » (génome réel) – et l'évolution différentielle. Par ailleurs, nous n'avons trouvé pour l'instant aucune publication décrivant une application dans le champ créatif basé sur les algorithmes à estimation de distribution ou sur l'évolution différentielle (plus utilisée dans l'industrie), ce qui n'est pas le cas des AG et des ES.

Il semble donc raisonnable de se tourner vers ces deux classes d'algorithmes, et d'étudier plus précisément en fonction des critères environnementaux et de la méthode morphogénétique qui seront choisis, leur implémentation et leur efficacité respectives. Il est tout aussi souhaitable de se placer dans un contexte multi-objectif, en autorisant des interactions de l'utilisateur, et à ne pas négliger la potentialité créative des techniques d'évolution de second ordre.

De manière générale, les experts s'accordent sur le fait que la réussite dépend de l'adaptation de l'AG au problème, avec notamment trois réglages fondamentaux : la pression de sélection, la taille de la population de solutions et les probabilités d'intervention des opérateurs. La bibliographie fournit largement la documentation nécessaire à la compréhension et à la mise en œuvre détaillée de ces algorithmes.

3.3.6.5.3 UTILISATION JUDICIEUSE D'UNE OPTIMISATION MULTI-OBJECTIFS COUPLÉE À UN IGA

La mise en œuvre conjointe d'un processus d'optimisation multi-objectifs et d'un IGA - par exemple dans le cadre de la créativité assistée - pose un certain nombre de difficultés concernant l'intégration du « geste créateur » de l'utilisateur dans la dynamique algorithmique propre au mécanisme évolutionnaire. Ce geste allant de la simple sélection dans une population de solutions proposées par l'AG, jusqu'à la modification partielle d'une solution retenue (baldwinisme, lamarkisme).

En optimisation multiobjectif, le problème principal est toujours de trouver, lorsqu'on ne le connait pas (mais le plus souvent c'est le cas), une bonne approximation du front de Pareto. Et en mode interactif, le problème est de trouver des solutions satisfaisant au mieux les exigences de l'utilisateur et signifiant dans le même temps une optimisation éco-orientée pertinente (plus que symbolique). On fait souvent l'hypothèse que les solutions qui nous satisfairont doivent se trouver quelque part sur le front de Pareto, parce qu'on se dit que l'utilisateur préférera forcément une solution non-dominée à une solution dominée, mais ça n'a rien d'évident. Parfois, il est utile de conserver des solutions sur les premiers fronts, plutôt que d'être systématiquement élitiste [69]. De plus, il suffit par exemple d'oublier un critère pertinent pour que le problème soit mal posé : c'est de loin plus important que la méthode utilisée pour le résoudre.

Si l'utilisateur ne précise pas en quoi la solution désignée le satisfait (ce peut être la forme de l'objet ou l'un des critères affichés), on ne peut qu'observer alors les n fitness objectives relatives à son choix subjectif, et tenter de recréer un espace de recherche proche pour optimiser « sa » solution au cours des prochaines itérations. Comment ? En général, on choisit de gérer n populations séparées pour garder trace des meilleures évolutions pour chaque objectif supposé indépendant, mais ça n'est pas obligatoire. On peut très bien se contenter d'une unique population, à condition de veiller au maintien de sa diversité, mais aussi d'une certaine pérennité des choix de l'utilisateur (ce qui peut poser des soucis, si ce dernier fait n'importe quoi, par exemple). On peut utiliser ici le rang des objectifs dans les populations, ou bien leurs fitness relatives, pour opérer une division de l'espace des critères.

La thèse de Carpentier [64] fournit ici une méthode extrêmement intéressante pour diriger un effort conjoint

de recherche et d'optimisation de solutions une fois que l'utilisateur a désigné celle « qui lui plaît ». L'algorithme de recherche multi-objectifs convoqué est le MOGLS de Jaszkiewicz (§4.3.3), et le calcul des coefficients de pondération utilise une propriété de la norme induite de Tchebycheff qui optimise le classement dans l'espace de recherche. L'auteur précise que si l'utilisateur émet plusieurs choix, on obtient alors un échantillonnage de l'espace des préférences. A partir de là, il nous faut construire une distribution de ces préférences et les substituer à la distribution uniforme dans l'algorithme. Ainsi, en permettant à l'utilisateur d'exprimer plusieurs choix sur les propositions qui lui sont présentées, on pourra orienter de manière plus variée l'évolution ultérieure de l'algorithme génétique. A étudier très sérieusement pour EcCoGen, car c'est une méthode relativement simple et pourtant très efficace !

Evidemment, « la grande question » est : ne va-t-on trop casser une dynamique d'optimisation en cours en tenant compte des choix successifs de l'utilisateur, et réciproquement ?. On ne peut répondre totalement, mais, si l'on veut garder les qualités de l'approche génétique, il faut essayer de construire des opérateurs qui ne déforment que « lentement » et de manière « relativement continue » l'objet courant (peu de mutations / croisements, entre autres, et plutôt locaux qu'uniformes). De plus, les problèmes sont en général plus faciles à appréhender par l'utilisateur quand les fonctions de fitness ne sont pas trop discontinues. Enfin, dans une approche multi-objectifs, la subjectivité de l'utilisateur se « cache » à deux niveaux : dans le choix des critères et dans leur pondération. Ainsi, on ne peut savoir que le problème est bien posé qu'une fois qu'on l'a résolu. Comme dans la majorité des simulations !

3.3.7 ANNEXE

3.3.7.1 MUTATION AUTO-ADAPTATIVE

Pour se débarrasser élégamment de la tâche fastidieuse du réglage des paramètres de la mutation, les pères des stratégies d'évolution, I. Rechenberg et H.P. Schwefel ont alors proposé de rendre la mutation auto-adaptative. Cette technique considère en fait les paramètres de la mutation eux-mêmes comme des variables supplémentaires, et les fait également évoluer via croisement et mutation, avant d'être utilisées pour la mutation des variables elles-mêmes. L'idée sous-jacente est que, bien que la sélection soit faite sur les valeurs de la fonction objectif *f* et non pas directement sur les paramètres de la mutation, un individu ne peut pas survivre longtemps s'il n'a pas les paramètres de mutation adaptés à la topographie de la portion de la surface définie par *f* où il se trouve. Schématiquement par exemple, les valeurs de σ doivent être petites lorsque le gradient de *f* est important, afin d'avoir plus de chance de faire des « petits pas ». On distingue trois cas suivant la complexité du modèle de matrice de covariance :

- **Le cas Isotrope** : il y a un σ par individu (soit C = Id). La mutation consiste alors à muter tout d'abord σ selon une loi log-normale (afin de respecter la positivité de σ, et d'avoir des variations symétriques par rapport à (1)), puis à muter les variables à l'aide de la nouvelle valeur de σ :

$$\begin{cases} \sigma := \sigma \ e^{\tau N_0(0,1)} \\ X_i := X_i + \sigma N_i(0,1) \quad i = 1, \ldots, d \end{cases}$$

- **Le cas non-isotrope** : il y a un σ par individu (soit C = diag(σ_1, . . . , σ_d). A noter que la

$$\begin{cases} \kappa = \tau N_0(0,1) \\ \sigma_i := \sigma_i \ e^{\kappa + \tau' N_i(0,1)} \quad i = 1, \ldots, d \\ X_i := X_i + \sigma_i N_i'(0,1) \quad i = 1, \ldots, d \end{cases}$$

mutation des σ_i comporte deux termes de forme log normale, un terme commun à tous les σ_i et un terme par direction :

• **Le cas général, dit corrélé**, dans lequel C est une matrice symétrique définie positive quelconque. On utilise alors pour pouvoir transformer C par mutation, tout en gardant sa positivité, une représentation canonique en produit de d(d−1)/2 rotations par une matrice diagonale. La mutation s'effectue alors en mutant d'une part la matrice diagonale, comme dans le cas non-isotrope ci-dessus, puis en mutant les angles des rotations :

$$\vec{N}(0, C(\vec{\sigma}, \vec{\alpha})) = \prod_{i=1}^{d-1} \prod_{j=i+1}^{d} R(\alpha_{ij}) \vec{N}(0, \vec{\sigma})$$

$$\begin{cases} \sigma_i = \sigma_i e^{\tau' N_0(0,1) + \tau N_i(0,1)} & i = 1, \ldots, d \\ \alpha_j := \alpha_j + \beta N_j(0,1) & j = 1, \ldots, d(d-1)/2 \\ \vec{X} := \vec{X} + \vec{N}(0, C(\vec{\sigma}, \vec{\alpha})) \end{cases}$$

Pour les trois cas, les divers Ni(0, 1) et N'i(0, 1) apparaissant dans les formules ci-dessus sont des réalisations indépendantes de variables aléatoires scalaires gaussiennes centrées et de variance 1. Suivant Schwefel [27], les valeurs recommandées (et relativement robustes) pour les paramètres supplémentaires sont β = 0.0873 (= 5°) et :

$$\tau \propto \frac{1}{\sqrt{2\sqrt{d}}} \quad , \quad \tau' \propto \frac{1}{\sqrt{2d}}$$

3.3.8 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] L. Ding, J. Gero, "The emergence of the representation of style in design", Env. and Planning, 2001.

[2] R. Kicinger, T. Arciszewski, Empirical analysis of memetic algorithms for conceptual design of steel structural systems in tall buildings, George Mason University, USA, 2006.

[3] S. Agrawal, A. Pratap, T. Meyarivan, A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimisation: NSGA-II, K.Deb, *Kangal report n° 200001*, 2000.

[4] L. Xiyu, J.H. Frazer, T. Ming Xi, A generative design system based on evolutionary and mathematical functions, Generative Arts, 2002.

[5] P. Marin. Exploration des mécanismes évolutionnaires appliqués à la conception architecturale. Thèse de Doctorat en sciences de l'Architecture, Université de Nancy, juin 2010.

[6] H. Mühlenbein, G. Paaß, *From recombination of genes to the estimation of distribution I. Binary parameters*, Lectures Notes in Computer Science 1141: Parallel Problem Solving from Nature, tome PPSN IV, pages 178--187, 1996.

[7] R. Storn, K. Price, Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for global Optimization over Continuous Spaces, 1997.

[8] U.K. Chakraborty, Advances in differential evolution, Springer, 2008.

[9] J. Lampinen, I. Zelinka, Mixed integer-continuous optimization by differential evolution, Mendel proc. P77-81, 1999.

[10] P. Collet, E. Lutton, Take it EASEA, Parallel Problem Solving from Nature VI, p891-901 Springer, 2000.

[11] F. Neri, V. Tirronen, Recent advances in differential evolution : a survey and experimental analysis, Springer, 2009.

[12] A.E. Eiben, J.E. Smith, Introduction to Evolutionary Computing. Springer Verlag, 2003.

[13] L.J. Fogel, A.J. Owens, M.J. Walsh, Artificial Intelligence through Simulated Evolution. NewYork, JohnWiley, 1966.

[14] I. Rechenberg, Evolution strategie : Optimierung Technisher Systeme nach Prinzipien des Biologischen Evolution. Fromman-Hozlboog Verlag, Stuttgart, 1972.

[15] H.P. Schwefel, Numerical Optimization of Computer Models. JohnWiley & Sons, New-York, 1981.

[16] C.A. Coello, D.A. Van Veldhuizen, G.B. Lamont, Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems. Kluwer Academic Publishers, 2002.

[17] K. Deb, Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms. John Wiley, 2001.

[18] J.H. Holland, Adaptation in Natural and Artificial Systems. University of Michigan Press, Ann Arbor, 1975.

[19] D.E. Goldberg. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Addison Wesley, 1989.

[20] K.A. DeJong. Are genetic algorithms function optimizers ? In R. Manner and B. Manderick, editors, Proceedings of the 2nd Conference on Parallel Problems Solving from Nature, pages 3–13. North Holland, 1992.

[21] T. Bäck. Evolutionary Algorithms in Theory and Practice. New-York:Oxford University Press, 1995.

[22] T. Bäck, D.B. Fogel, Z. Michalewicz, Handbook of Evolutionary Computation. Oxford University Press, 1997.

[23] D.B. Fogel. Evolutionary Computation. Toward a New Philosophy of Machine Intelligence. IEEE Press, Piscataway, NJ, 1995.

[24] J.R. Koza. Genetic Programming II : Automatic Discovery of Reusable Programs. MIT Press, Massachussetts, 1994.

[25] A. Blansche, « Classification non supervisée avec pondération d'attributs par des méthodes évolutionnaires », Laboratoire des sciences de l'image, de l'informatique et de la Télédétection, Strasbourg I, Septembre 2006.

[26] R. Smith, S. Forrest, A.S.Perelson, Searching for Diverse, Cooperative Populations with Genetic Algorithms. Evolutionary Computation, 1(2), 127-149, 1993.

[27] O. Maitre, N. Lachiche, P. Clauss, L. Baumes, A. Corma, P. Collet, Efficient Parallel Implementation of Evolutionary Algorithms on GPGPU Cards, EuroPar Parallel Processing, Springer LNCS 5704, 2009.

[28] Y. Nagata, S. Kobayashi, Edge Assembly Crossover : a High-power Genetic Algorithm for the Traveling Salesman Problem, Proceedings of the 7th International Conf. on Genetic Algorithms, 1997.

[29] J. Imae, M. Nagata, T. Kobayashi, G. Zhai, Some Properties of Algorithmic Control for Realtime Optimization, in Proceedings ICARCV, pp.1-6, 2006.

[30] V. Lefort-Mathivet, Evolution de second ordre et algorithmes évolutionnaires : l'algorithme RBF-Gene, Thèse de Doctorat de l'Université de Lyon, INSA de Lyon, 2007.

[31] C. Knibbe, Structuration des génomes par sélection indirecte de la variabilité mutationnelle : une approche de modélisation et de simulation. Thèse de l'Université de Lyon, INSA de Lyon, 2006.

[32] J.B. Lamarck, Philosophie zoologique, 1809.

[33] J. M. Baldwin, Un nouveau facteur en évolution, 1896.

[34] J. Staune, Au delà de Darwin, Ed. Jacqueline Chambon, 2009.

[35] M.J. Denton, Protein-based life as an emergent property of matter: the nature and biological fitness of the protein folds, in *Fitness of the Cosmos for Life,* Cambridge University Press, 2008.

[36] C. de Duve, À l'écoute du vivant, éditions Odile Jacob, Paris, 2002.

[37] S. Conway Morris, The predictability of evolution : glimpses into a post-Darwinian world. Naturwissenschaften, 96 (11). pp. 1313-1337. ISSN 0028-1042, 2009.

[38] J. Chaline, Quoi de neuf depuis Darwin ? Ed. Ellipses, 2006.

[39] B. Goodwin, R.V. Sole, Signs of Life: How Complexity Pervades Biology, ISBN 0465019277, 2001.

[40] M.W. Ho, The rainbow and the worm, World scientific, 1998.

[41] M.P. Schützenberger, The miracles of Darwinism, *Origins & Design*, Access Research Network, 1996.

[42] R. Chauvin, Le darwinisme ou la fin d'un mythe, Editions du Rocher, 1997.

[43] A. Paldi, l'hérédité sans gènes, Editeur le Pommier, 2009.

[44] G. Beslon, Apprivoiser la vie : Modélisation individu-centrée de systèmes biologiques complexes, Thèse de HDR de l'Université de Lyon, 2008.

[45] F. Collins, The language of life : DNA and the revolution in personalized medicine, Harper-Collins, 2010.

[46] P. Jolivet, Le principe de Baldwin ou l'effet Baldwin en biologie. Une bonne explication ou une échappatoire des darwinistes ? Revue « l'entomologiste », vol. 63, n°6, pp.309-318, 2007.

[47] E. Lutton, Darwinisme artificiel : une vue d'ensemble, rev. « Traitement du signal », vol.22, n°4, 2005.

[48] J. Holland, J. Reitman, Cognitive systems based on adaptive algorithms, Pattern-Directed Inference Systems, New-York Academic Press, 1978.

[49] R. Le Riche, M. Shoenauer, M. Sebag, Un état des lieux de l'optimisation évolutionnaire et de ses implications en sciences pour l'ingénieur, Modélisation Numérique : défis et perspectives, 2nd volume, Traité Mécanique et Ingénierie des Matériaux, Editions Hermes, pp. 187-259, 2007.

[50] S. Kern, N. Hansen, S. Müller, D. Büche, J. Ocenasek, P. Koumoutsakos, Distributions in continuous evolutionary algorithms - review and comparison, Natural Computing, 3(1) :p77–112, 2004.

[51] P. Larranaga, J.A. Lozano, Estimation of distribution algorithms : a new tool for evolutionary computation, Kluwer Academic Publishers, 2001.

[52] N. Hansen, A. Ostermeier, A. Gawelczyk, On the adaptation of arbitrary normal mutation distributions in evolution strategies : the generating set adaptation, in Proceedings of the 6th International Conference on Genetic Algorithms, pp 57–64, Morgan Kaufmann, 1995.

[53] N. Hansen, A. Ostermeier, Adapting arbitrary normal mutation distributions in evolution strategies : the covariance matrix adaption, in Proceedings of the third IEEE International Conference on Evolutionary Computation, pp 312–317, 1996.

[54] N. Hansen, A. Ostermeier, Completely derandomized self-adaptation in evolution strategies, Evolutionary Computation, 9(2) : p159–195, 2001.

[55] N. Hansen, S. Müller, P. Koumoutsakos, Reducing the time complexity of the derandomized evolution strategy with covariance matrix adaptation (CMA-ES), Evolution Computation, 11(1), 2003.

[56] C. Igel, N. Hansen, S. Roth, Covariance matrix adaptation for multi-objective optimization, Evolutionary Computation, 614(4), 2006.

[57] W.E. Hart, N. Krasnogor, J.E. Smith, Recent advances in memetic algorithms, Studies in Fuzziness and Soft Computing, volume 166, Springer, 2005.

[58] P.D. Surry, N.J. Radcliffe, Formal algorithms + formal representations = search strategies, Proceedings of the 4th Conference on Parallel Problems Solving from Nature, number 1141, LNCS, pp 366–375. Springer Verlag, 1996.

[59] « Projet Fractales », Approches Fractales pour l'Analyse et la Modélisation des Signaux, Rapport d'activités de l'INRIA, 2002.

[60] D.H. Wolpert, W.G. MacReady, No free lunch theorems for search, Technical Report SFI-TR-95-02-010, Santa Fe Institute, 1995.

[61] S. Roudavski, Towards morphogenesis in architecture, International journal of architectural computing, issue 03, volume 07, 2010.

[62] N. Leach, Digital Morphogenesis, *Architectural Design*, 79, vol 1, pp 32-37, 2009.

[63] A. Jaszkiewicz, Genetic local search for multiple objective combinatorial optimization. *European Journal of Operational Research,* 2002.

[64] G. Carpentier, Approche computationnelle de l'orchestration musicale, optimisation multicritère sous contraintes de combinaisons instrumentales dans de grandes banques de sons, IRCAM, Thèse de l'Université Paris VI, 2008.

[65] J.C. Quiroz, J.L. Sushil, A. Banerjee, S.M. Dascalu, Reducing User Fatigue in Interactive Genetic Algorithms by Evaluation of Population Subsets, *Rapport IEEE*, 2009.

[66] H. Ishibuchi, T. Murata, Multi-Objective genetic local search Algorithm, *Proc. of 3rd IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, pp. 119–124, 1996.

[67] H. Ishibuchi, T. Yoshida, T. Murata, Balance between genetic search and local search in hybrid evolutionary multi-criterion optimization algorithms, 2002.

[68] S. Elaoud, T. Loukil, J. Teghem, The Pareto fitness genetic algorithm : test function study, European Journal of Operational Research, no. 177, 1703–1719, 2007.

[69] J.C. Quiroz, J.L. Sushil, A. Banerjee, A model of creative design using collaborative interactive genetic algorithms, *Design Computing and Cognition DCC'08,* Springer, 2008.

3.4 LES MÉTHODES D'ÉVALUATION DE LA CRÉATIVITÉ

Auteur :
Nicolas Gregori, CODISANT Interpshy

Christian Brassac CODISANT Interpshy

3.4.1 CONTEXTE ET OBJECTIFS

3.4.1.1 RAPPEL

La créativité est un objet d'études relativement ancien et pluri-disciplinaire, comme en témoigne par exemple le travail de Wehner, Csikszentmihalyi et Magyari-Beck (1991) qui en ont donné quelques contours il y a une vingtaine d'années. Dans une étude portant sur les termes utilisés selon les disciplines, ils ont noté la difficulté de définir de façon claire ce que peut recouvrir le concept de créativité. Ainsi, selon que la créativité est étudiée par un économiste, un sociologue, un psychologue, un manager, un ergonome, un informaticien, un psychanalyste, etc., et même selon qu'elle est étudiée, à l'intérieur même d'une discipline par des chercheurs différents, différents termes seront mobilisés pour la décrire.

L'objectif de cett tâche est de produire un état de l'art sur la créativité et ses méthodes d'évaluation dans le but de contribuer à la production d'un outil d'assistance au design architectural dans le domaine de l'éco-conception, ce qui est l'objectif général du projet EcCoGen.

3.4.1.2 MÉTHODE

La revue de littérature que nous proposons dans ce document sert un double objectif : celui de rendre compte de la créativité des individus (architectes) elle-même et de son évaluation en tant que telle et celui de la potentialité créative du dispositif socio-technique composé à la fois de la "machinerie numérique" en développement, des usagers de cet outil et de l'environnement dans lequel cet usage a lieu. Il est donc nécessaire de faire le point sur la définition et sur les modèles actuels de la créativité, mais aussi de se placer dans le cadre de la psychologie ergonomique pour qualifier l'efficacité du dispositif numérique en développement. Cela nous amènera à étudier les méthodologies d'évaluation de la créativité elle-même, mais aussi celle du dispositif numérique en vue, notamment de penser les conditions d'une assistance. Cela nous entraînera sur le terrain de l'usage, c'est-à-dire vers des méthodes qui complètent les évaluations "classiques" de la psychologie cognitive et de l'ergonomie en donnant une place particulière au sens que l'individu donne lui-même à son activité, méthodes que l'on trouve du côté du CSCW, de l'ethnographie, des théories de l'activité.

Les frontières principales à l'intérieur desquelles nous réalisons cette revue de littérature sont celles de la psychologie cognitive, sociale et ergonomique. Au niveau international, les revues phares sur lesquelles nous nous sommes appuyés sont *Design Studies* et surtout *Creativity Research Journal* dont le comité de rédaction est composé de chercheurs incontournables du côté de la psychologie parmi lesquels : Mark Runco (rédacteur en chef), Teresa Amabile, Arthur Cropley, Mihaly Csikszentmihalyi, Ravenna Helson, Roberta Milgram, Dean Simonton, Robert Sternberg ou encore Robert Weisberg. Au niveau national, les revues qui nous ont guidées sont plutôt celles qui présentent des travaux de l'ergonomie, notamment la revue *@ctivités* et *Le Travail Humain*. Pour ce qui concerne plus spécifiquement les liens avec le design architectural, les conférences 01'Design[27] et SCAN[28] sont importantes à suivre. On peut encore ajouter les ouvrages de Todd Lubart (2003), Jean-Charles Lebahar (2007), Jean-Michel Hoc et Françoise Darses (2004), ou ceux de

[27] Colloque sur la conception et le design, depuis 1997.

Nathalie Bonnardel (2006), sachant que les auteurs des deux derniers ouvrages cités se situent moins du côté de la créativité que de celui de la conception, contrairement aux deux premiers.

3.4.2 CRÉATIVITÉ, CONCEPTION

3.4.2.1 LA CRÉATIVITÉ : DÉFINITION(S) ET MODÈLES

3.4.2.1.1 ÉLÉMENTS DE DÉFINITION

Il est difficile de donner une définition de la créativité dans laquelle chacun se reconnaîtra. On peut cependant relever un certain nombre d'éléments partagés dans les diverses définitions que l'on trouve dans la littérature, qu'elle soit récente ou moins récente (Amabile, 1996 ; Bonnardel, 2006 ; Guilford, 1950 ; Leboutet, 1970 ; Lubart, 2003 ; Runco, 1995 ; Simonton, 1999 ; Sternberg, 2006 ; Welling, 2007). La créativité renvoie à une compétence cognitive, à une capacité d'un individu (ou d'un collectif d'individus) à produire un objet, une idée, un service qui soit nouveau et qui prenne forme dans un environnement donné. La créativité est donc à la fois banale, quotidienne ou bien alors extraordinaire, renvoyant alors à des inventions déterminantes. Mais dans tous les cas, elle est réalisée dans un contexte particulier. Nous passons brièvement en revue ces trois éléments : composante individuelle, personnelle de la créativité, nouveauté et contexte (aspects collectifs et environnementaux).

3.4.2.2 COMPOSANTE INDIVIDUELLE DE LA CRÉATIVITÉ

La créativité peut-être considérée comme renvoyant à un don, à quelque chose de plus ou moins surnaturel. Freud faisait le lien avec l'inconscient, la créativité étant alors une expression socialement acceptable de pulsions inconscientes. Une question fréquemment posée est de savoir si les individus créatifs partagent quelque chose en commun, qui permettrait de définir une personnalité créatrice. On trouverait préférentiellement de telles personnalités dans des identités sociales de type artistiques ou scientifiques, elles renverraient à des motivations fortes et seraient capables d'un bon niveau d'abstraction (Helson, 1996).

Lubart (2003) renvoie, quant à lui, à la composante conative de la créativité pour faire le lien avec la motivation, la volonté de réaliser un acte. Il s'agit, pour lui, de montrer la manière dont cognitions et affects s'articulent dans nos façons de nous comporter. A propos de la créativité, les traits de personnalité interviendraient dans l'utilisation efficace des composantes cognitives, par exemple pour faciliter la transformation d'idées abstraites en réalisations concrètes. Il cite une étude de MacKinnon (1962) portant sur des architectes dans laquelle il montre que ceux-ci apparaissent comme plus indépendants, plus spontanés, moins conformistes, plus individualistes que la population standard.

Ainsi, de façon générale, les personnes créatives seraient plus ouvertes aux nouvelles expériences, plus confiantes, moins conventionnelles, plus ambitieuses. Elles seraient plus tolérantes vis-à-vis des perceptions ambiguës, ce qui permettrait une plus grande acceptation de la divergence et éviterait d'accepter trop vite des solutions banales, "toutes faites". Cette tolérance serait également une preuve de curiosité et faciliterait la prise de risques.

Cette façon de faire référence à l'individu, en tant que personnalité plus ou moins créative, a été mise en question par Lebahar (2007) dans la description de ce qu'il nomme le "sujet-concepteur", sujet psychologique qui conçoit des artefacts. Il le définit en effet comme « un système complexe de connaissances et d'actions [qui] est auto-organisé [qui] utilise et coordonne des moyens qui lui permettent de réaliser des tâches de conception, en s'adaptant à différentes situations » (2007, p. 17). Ainsi donc, l'action du sujet-concepteur de Lebahar n'est pas (entièrement) déterminé par ses caractéristiques de

[28] SCAN : Séminaire de conception architecturale numérique, depuis 2005.

personnalité, telles qu'on pourrait les mesurer à partir de tests, mais elle relève d'interactions complexes mêlant les aspects individuels, sociaux, environnementaux, technologiques, politiques, historiques, culturels.

3.4.2.3 LA NOUVEAUTÉ DANS LA CRÉATIVITÉ ET SON VERSANT ADAPTATIF

Il n'y a pas de définition simple de la créativité, mais des perceptions diverses selon le focus que les auteurs donnent dans leurs travaux, selon leurs disciplines et selon leurs approches dans ces disciplines. La caractéristique véritablement consensuelle est celle qui relève de l'aspect novateur liée à créativité, que cette innovation soit bénigne, qu'elle n'appartienne qu'au seul individu qui la produit (à la façon d'un enfant qui "crée" des formes ou des comportements que bien d'autres enfants ont "créés" avant lui) ou qu'elle révolutionne les modes de vie et de pensée des sociétés. Ainsi donc, chaque comportement d'un être humain est une création. Chaque parole proférée est sans cesse réinventée, produite dans un contexte toujours nouveau, produisant des effets toujours inattendus. On pourrait donc dire, par exemple à la suite de Welling (2007) ou de Joas (1999) que chaque acte humain pourrait être considéré comme étant un acte créatif puisqu'aucune situation n'est exactement identique à aucune autre. La question de la nouveauté n'est donc pas si simple qu'il y paraît, bien qu'elle fasse, nous l'avons vu, l'objet d'un consensus pour affirmer qu'elle est une dimension caractéristique de caractériser la créativité.

Pour différencier la pensée ordinaire et la pensée créatrice, les auteurs mettent souvent en avant la production liée à la création. C'est ce que faisaient déjà Wertheimer (1945) à travers la notion d'illumination (ou *insight)* ou encore Guilford (1950 ; 1959) dans ses travaux sur la pensée divergente. Une autre composante, liée à la nouveauté, relève de l'adaptation de la production au contexte (Simonton, 1999) : il ne suffit pas que la production soit nouvelle, encore faut-il qu'elle soit utile aux individus (et qu'elle soit utilisable, diraient les ergonomes). Simonton met l'accent sur le fait que les productions n'apparaissent pas dans un vide social, mais qu'elles sont au contraire prises dans des normes pratiques et esthétiques, que leur valeur même prend corps dans une société valorisant tel ou tel type de produits. On est ici proche des travaux de Latour (1989), même si les auteurs ne se citent pas réciproquement.

La nouveauté peut en outre être plus ou moins prescrite (Bonnardel, 2006). Cela peut provenir de contraintes issues de l'énoncé du problème lui-même, par exemple du cahier des charges (besoins identifiés, objectifs de conception). Cela peut provenir du concepteur lui-même qui, au cours de la conception, va lui-même définir de nouvelles contraintes à satisfaire (Darses, 1994 ; (Gregori, 1999). Ces contraintes, explicites pour certaines, implicites pour les d'autres, participent à la définition de l'espace dans lequel le problème doit être travaillé et interviennent dans la créativité par l'ouverture / fermeture de cet espace, par des productions graphiques, par des analogies, etc.

A propos de cette "nouveauté" inscrite dans la création de nouveaux objets, des auteurs insistent sur l'opposition (en fait un continuum) entre la création ordinaire, quotidienne et la création extraordinaire, fondamentale ; entre la création "psychologique", qui vaut du point de vue de l'individu et la création "historique", qui vaut au regard de l'humanité (Boden, 1992 ; Cohen, 1989).

3.4.2.4 SOCIALITÉ ET ENVIRONNEMENT

De plus en plus de travaux mettent en évidence le rôle de l'environnement et/ou du collectif dans la créativité (Amabile, Goldfard, & Brackfield, 1990 ; Détienne, Visser, & Tabary, 2006 ; Lebahar, 2007 ; Csikszentmihalyi, 1996 ; Runco, 1995). Il s'agit de montrer que le sujet n'est pas seul face à sa tâche de créativité, mais qu'il est accompagné d'autres individus et/ou d'instruments. Ainsi Csikszentmihalyi (1996) développe-t-il une approche systémique de la créativité associant trois systèmes : l'individu lui-même (on retrouve ici la composante individuelle présente dans toutes les définitions), le domaine de connaissances de cet individu, lié à une culture donnée, et le champ dans lequel l'activité de l'individu a lieu, renvoyant aux notions de communautés et d'institutions contrôlant le domaine de connaissances.

Amabile *et al.* (1990), se sont intéressés à l'influence de la présence d'autrui sur la créativité. La question est de savoir si les sujets créatifs sont sensibles ou non à l'évaluation de leurs productions par autrui. Dans cette étude, les auteurs ont mené deux expériences au cours desquelles certains sujets attendaient que leur travail soit évalué par des experts, tandis que les autres n'attendaient pas d'évaluation particulière. Dans la première expérience, la présence d'autrui a été opérationnalisée en tant que "coaction" : la moitié des sujets ont travaillé individuellement dans de petits groupes alors que les autres ont travaillé seuls. Dans la deuxième expérience, la présence d'autrui a été opérationnalisée en tant que "surveillance" : la moitié des sujets pensaient être observés contrairement à l'autre moitié.

Dans les deux études, la créativité des productions a été évaluée par des juges experts. Les résultats des auteurs indiquent que la créativité était inférieure dans les groupes s'attendant à une évaluation par rapport à ceux qui n'attendaient pas d'évaluation. La "coaction" n'a pas d'effet, tandis que la "surveillance" semble avoir un effet négatif faible.

Ce qui nous intéresse dans le cadre du projet EcCoGen, c'est la confirmation selon laquelle le fait de s'attendre à une évaluation de la part d'experts (des enseignants, des professionnels) peut avoir un effet négatif sur la performance créative. Les auteurs font également l'hypothèse que dans le cas de travail en groupe (coaction), les réponses dominantes, qui sont aussi souvent les moins innovantes, pourraient être plus facilement acceptées du fait du même du groupe.

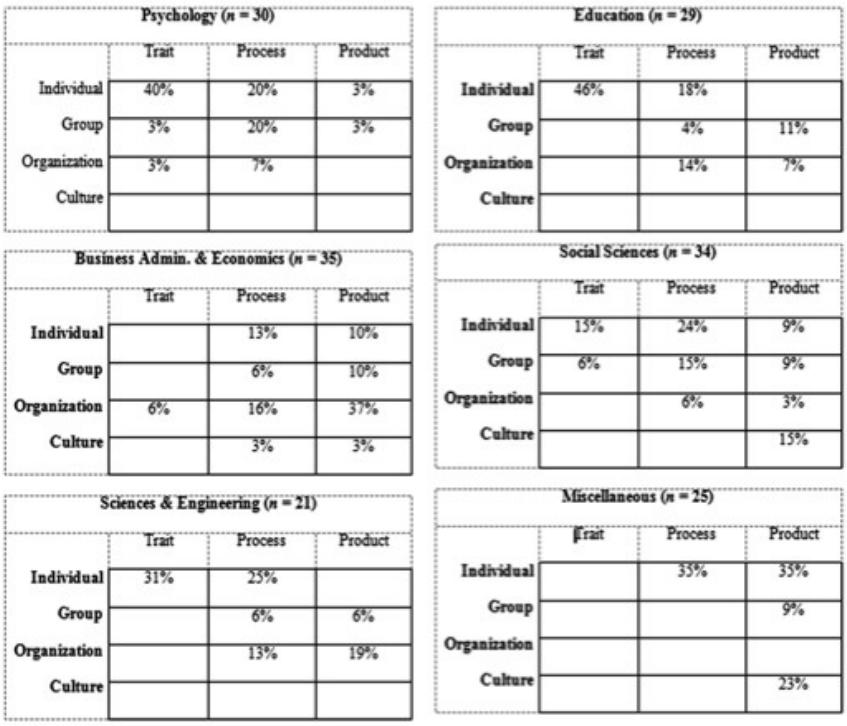
3.4.2.4.1 PREMIÈRES CONCLUSIONS SUR L'ÉTUDE DE LA CRÉATIVITÉ

3.4.2.5 DES ÉTUDES PLUTÔT QUANTITATIVES, PORTANT SUR LES TRAITS CRÉATIFS

Dans une étude récente, Kahl, Hermes da Fonseca, & Witte (2009) ont passé en revue les recherches actuelles sur la créativité en analysant les résumés d'articles consacrés à cette notion (119 résumés ont été sélectionnés sur les années 2005-2007). Des mots-clés liés à la créativité ont été rassemblés pour constituer une base de données. Les résumés ont été codés par discipline, par objets de recherches (traits de personnalité, processus créatif, productions créatives), par niveau social d'analyse (individu, groupe, organisation) et par types de recherches (empiriques *vs.* théoriques ; quantitatives *vs.* qualitatives). Les auteurs ont construits des arbres de classification permettant de discuter les relations entre les disciplines, les objets de recherche, les niveaux sociaux d'analyse (Figure 13).

On constate par exemple que sur les 30 résumés analysés en psychologie, les études portent préférentiellement sur les traits psychologiques des individus. Bien plus que sur les productions de groupes. Nous y reviendrons plus loin dans la partie consacrée à la méthodologie. On retrouve en tout cas ce phénomène dans les ouvrages de Bonnardel (2006), Borillo et Goulette (2002) et Lubart (2003) qui consacrent bien plus d'espaces à la présentation de l'individu au travail plutôt qu'aux aspects collectifs de la créativité. C'est encore plus manifeste dans l'ouvrage de Lebahar (2007).

Kahl *et al.* (2009) ont comparé leur travail à celui plus ancien mené par Wehner *et al.* (1991). Ils notent une tendance récente à mettre plus l'accent sur les productions créatives que cela n'était le cas il y a une vingtaine d'années, lorsque les travaux portaient plus sur les traits de personnalité ou sur le processus créatif. Toutefois, cela n'est qu'une tendance et le focus reste très largement mis sur la créativité de l'individu. Ils notent également une inflexion à propos du type de recherches menées lors des années 2005-2007 par rapport à l'année 1986 qui formait la base du travail de Wehner *et al.* (1991), celles-ci étant moins qualitatives qu'auparavant, au bénéfice d'études théoriques-quantitatives. Cependant, ce sont les études empiriques qui dominent toujours par rapport aux contributions théoriques.



Psychology (n = 30)

	Trait	Process	Product
Individual	40%	20%	3%
Group	3%	20%	3%
Organization	3%	7%	
Culture			

Education (n = 29)

	Trait	Process	Product
Individual	46%	18%	
Group		4%	11%
Organization		14%	7%
Culture			

Business Admin. & Economics (n = 35)

	Trait	Process	Product
Individual		13%	10%
Group		6%	10%
Organization	6%	16%	37%
Culture		3%	3%

Social Sciences (n = 34)

	Trait	Process	Product
Individual	15%	24%	9%
Group	6%	15%	9%
Organization		6%	3%
Culture			15%

Sciences & Engineering (n = 21)

	Trait	Process	Product
Individual	31%	25%	
Group		6%	6%
Organization		13%	19%
Culture			

Miscellaneous (n = 25)

	Trait	Process	Product
Individual		35%	35%
Group			9%
Organization			
Culture			23%

FIGURE 1 Aspect and social level by discipline: Cells represent percentages of scores. The sample size (n) indicates the number of abstracts from the entire sample (N = 119).

Figure 23. Objets de recherche et niveau sociaux en fonction des disciplines traitant de la créativité. *Extrait de (Kahl* et al., *2009)*.

3.4.2.6 DEUX MODÈLES DOMINANTS

Dans une revue de questions portant sur portant sur les traits créatifs, Welling (2007) identifie quatre opérations mentales déterminantes : *application*, *analogie*, *combinaison* et *abstraction*. Selon lui, les opérations interviennent dans tout processus créatif, mais ne sont pas prédictives. Parmi ces quatre opérations, l'abstraction tient une place particulière, alors qu'elle a été largement négligée dans les travaux sur la créativité. L'auteur précise que l'analyse de ces quatre opérations fondamentales pourrait donner une perspective nouvelle à propos de l'opposition entre une vision faisant la part belle à la rupture, à l'illumination dans le processus créatif, et une autre vision renvoyant à une progression plus "ordinaire" de ce processus.

En effet, on peut distinguer deux approches importantes concernant la créativité. L'une relève de la "configuration". Elle prend notamment ses racines dans les travaux de Wallas (1926) et de Wertheimer (1945) et met l'accent sur le fait que les individus développent des solutions créatives de façon largement inconscientes et qu'ensuite ces solutions prennent sens en tant que forme, en tant qu'ensemble signifiant (Smith, 1995). L'autre s'appuie sur une combinaison entre les traits créatifs, les productions et les relations entre individus (Amabile, 1996 ; Csikszentmihalyi, 1996 ; Lubart, 2003 ; Weisberg, 1995).

3.4.2.6.1 LA PLACE DE L'ILLUMINATION / INSIGHT

La description du processus créatif faite par Wallas (1926) procède en quatre étapes : la *préparation* (analyse préliminaire de la tâche), *l'incubation* (qui correspond à une sorte de mise à distance de la tâche par le sujet, d'inactivité apparente mais durant laquelle le problème est en réalité travaillé de façon inconsciente

par le sujet), *l'illumination* (la survenue soudaine d'une idée qui pourrait permettre de résoudre la tâche) et la *vérification* (qui constitue en l'évaluation de l'idée, en sa redéfinition éventuelle). Le point central de ce modèle repose sur la phase d'illumination (ou *insight*), la question posée étant de savoir comment le sujet "perçoit" soudainement ce qu'il ne percevait pas auparavant ou ce que les autres ne perçoivent pas. Cela renvoie aux problèmes de figure-fond désormais classiques en psychologie (exemple du vase de Rubin).

Ce modèle de la créativité tend à montrer que la création ne procède pas d'une méthode analytique, ni de la mise en place d'une stratégie de résolution qui pourrait être systématisée. Il affirme au contraire que la création est une activité inscrite dans l'environnement. Le "saut créatif" (Cross, 1997) au cours duquel une solution émerge doit être analysé en fonction du contexte dans lequel il se produit. On comprend alors que l'illumination / insight s'inscrit pleinement dans ce contexte et qu'on devrait peut-être parler de *pont* plutôt que de *saut*.

Le modèle de Wallas a été retravaillé, notamment par Amabile (1996) qui ajoute une phase de découverte du problème, mais les critiques ont surtout porté sur une vision plus complexe du processus créatif et proposent une approche multivariée permettant, par exemple, d'envisager que certains processus puissent être simultanés.

3.4.2.6.2 MODÈLES COMPOSITIONNELS

Plusieurs auteurs décrivent le processus créatif comme relevant d'une composition entre les traits de personnalité, les productions et les facteurs contextuels, comprenant les relations sociales (Amabile, 1996 ; Csikszentmihalyi, 1996 ; Lubart, 2003 ; Simonton, 1999 ; Weisberg, 1995). Ces approches mettent en général l'accent sur l'importance du langage, ce qui a des incidences méthodologiques comme nous le verrons plus loin. L'une des critiques formulées contre le modèle "classique" (point précédent) est qu'il ne tient pas compte de l'expertise des sujets. Quel que soit l'individu, le processus créatif serait toujours le même. Une autre critique porte sur la possible simultanéité des phases qui n'est pas envisagée, celles-ci se produisant séquentiellement.

3.4.2.7 MODÈLE D'AMABILE (PSYCHOLOGIE SOCIALE)

Le modèle compositionnel d'Amabile (1996) donne trois composants principaux contribuant à la créativité :

– des *compétences spécifiques relatives au domaine de la tâche*, qui renvoient aux connaissances et compétences de l'individu et dépendent de ses habiletés cognitives, perceptives, de sa formation ;

– des *compétences de créativité générales* (inter-domaines), qui renvoient à des styles cognitifs, à des connaissances et compétences permettant de générer des idées, des solutions, à l'expérience individuelle ainsi qu'aux traits de personnalité ;

– la *motivation* à la tâche, qui peut être interne, relevant de la propre motivation du sujet, ou externes, relevant de l'environnement et souvent liée à des récompenses, matérielles ou symboliques.

A l'aide de trois études de créativité faisant appel à des tâches variées (histoires courtes, tâche artistique), Conti, Coon et Amabile (1996) confirment ce modèle. Des mesures prises dans différents contextes, mais à l'intérieur d'un même domaine, ont généralement montré des corrélations modérées mais significatives. Les auteurs mettent ainsi en évidence des compétences générales de créativité à travers différentes tâches dans un même domaine de créativité aussi bien que dans des domaines très différents. En outre, la motivation interne des individus permet de prédire un plus haut taux de créativité tandis que la motivation externe (liée par exemple à une récompense) est moins robuste pour une telle prédiction.

Le rapport entre les compétences générales (inter-domaines) et spécifiques (intra-domaine) a été étudié par Hong et Milgram (2010). Les auteurs ont fait varier l'appartenance ethnique, le genre ainsi que l'âge et/ou le

niveau scolaire dans trois études. Dans chacune de ces trois études, les auteurs observent un effet causal des compétences générales sur les compétences spécifiques. Ils en concluent que les diverses expériences de l'individu peuvent avoir un impact fort sur les compétences spécifiques.

3.4.2.8 MODÈLE DE LUBART (PSYCHOLOGIE COGNITIVE)

Le modèle, également compositionnel, de Lubart (2003) décrit les éléments suivants pour la créativité :

– les capacités cognitives du sujet, qui peuvent être synthétiques, analytiques ou pratiques ;

– les connaissances, notamment dans le domaine considéré ;

– la personnalité, étant donné que certaines "qualités" semblent favoriser la créativité, telles que la persévérance, l'indépendance / autonomie, la tolérance à l'ambiguïté, la prise de risque ;

– les styles cognitifs, correspondant aux préférences du sujet en termes de traitement de l'information (par exemple la dépendance / indépendance à l'égard du champ, un style global ou minutieux, le style global permettant une meilleure appréhension du problème dans sa généralité) ;

– la motivation qui, comme chez Amabile, peut être intrinsèque ou extrinsèque, mais qui, dans le modèle de Lubart constituent l'une et l'autre des ressources importantes pour la créativité en incitant le sujet à rester concentré sur sa tâche.

Toutes les composantes n'ont pas une force égale pour la créativité. Ainsi les styles cognitifs sont moins en lien avec le taux de créativité que la motivation. Ils sont plus en lien avec la nature de la créativité, c'est-à-dire avec la manière dont l'individu va produire des idées nouvelles. Pour le résumer, le modèle de Lubart fait appel à des facteurs cognitifs, conatifs, émotionnels et environnementaux.

3.4.2.9 APPROCHE PSYCHOMÉTRIQUE ET RÔLE DE LA PENSÉE DIVERGENTE DANS LA CRÉATIVITÉ

De façon très classique, la cognition est décrite comme façon dont les individus perçoivent, organisent, traitent, stockent, manipulent l'information à laquelle ils sont soumis. L'approche psychométrique va mesurer des performances d'individus, notamment sur des épreuves de créativité pour ce qui concerne cette revue de littérature, en mettant particulièrement en avant la *pensée divergente* (Guilford, 1950 ; Torrance, 1976).
La question cruciale, à propos de la créativité, est souvent celle de la "qualité créative" des productions : comment s'assurer que cette production est effectivement nouvelle, originale, mais n'est pas pseudo-créative ou peu adaptée aux besoins ? Comme nous l'avons vu, la créativité implique la génération d'une nouveauté et l'évaluation de cette nouveauté. C'est ce que l'on retrouve respectivement derrière les notions de pensée divergente et de pensée convergente. Les deux pensées fonctionnent ensemble selon Cropley (2006).
La *pensée divergente*, souvent donnée pour être la base de la créativité, consiste en la production de diverses propositions sur un problème donné. Cela nécessite de faire des liens plus ou moins attendus et prévisibles entre diverses informations liées au problème, à les transformer, à les faire fonctionner ensemble. C'est ainsi que Guilford (1959), dans sa mesure de la créativité fondée sur la pensée divergente, s'est concentré sur la fluidité verbale et idéationnelle, la flexibilité sémantique ou encore sur la fluidité associative et l'originalité.
La *pensée convergente*, quant à elle, consiste à évaluer ce qui pourrait constituer la "meilleure" réponse à une situation donnée. Cela consiste à appliquer des stratégies et techniques de travail et de prise de décision, à vérifier des données, à raisonner, bref à recourir au familier, au déjà-connu afin d'opérer un traitement de type cumulatif sur les données auxquelles on fait face. La pensée convergente est donc plus particulièrement efficace dans les situations où la réponse donnée doit pouvoir être évaluée en termes de qualité (bonne ou

mauvaise).
D'après Cropley (1999), la pensée convergente comme la pensée divergente mène à la production d'idées nouvelles et cela contrairement à ce qui est parfois affirmé. La différence entre les deux productions serait qualitative : là où la pensée convergente tend vers l'orthodoxie, le déjà-connu, la pensée divergente produit de la diversité, de l'originalité. Toutefois, Cropley remarque que la production de la diversité au moyen de la fluidité, de la flexibilité et de l'originalité ne garantit pas à elle seule la créativité (pensée divergente). Cette diversité cause en effet de la surprise chez le sujet qui peut, sur ce seul effet, avoir l'impression de découvrir quelque chose de nouveau, de faire des associations inattendues alors, qu'en réalité, cette nouveauté n'en est pas vraiment une. L'auteur parle alors de pseudo-créativité si la production est simplement non-conforme ou de quasi-créativité si la production est effectivement nouvelle mais se trouve faiblement adaptée à la réalité ou aux besoins des individus.
Pour s'en assurer, il faut lier pensée divergente et pensée convergente. Toujours selon Cropley, ni la production convergente, ni la production divergente ne mènent seule à une nouveauté efficace. La pensée divergente ne peut apparaître sans un niveau minimum de pensée convergente, c'est-à-dire sans que l'individu soit capable d'évaluer, quasiment en direct, la production qu'il vient de réaliser. En outre, dans les deux cas (pensée divergente et convergente), l'individu doit être capable de mettre en œuvre des stratégies cognitives et des procédures de contrôle qui dirigent son activité. On retrouve ici un lien avec les styles cognitifs décrits plus haut dans les modèles compositionnels. Pensée convergente et pensée divergente fonctionnent alors comme des styles cognitifs permettant de faire face au problème posé et aux données courantes.

3.4.2.9.1 REMARQUES CONCLUSIVES SUR LES MODÈLES

Les approches de la créativité étudiées ici (modèle par phases et modèle compositionnel), de même que la focalisation sur la pensée divergente, mettent en question la compétence créatrice. S'agit-il d'un processus progressif dans lequel les solutions apparaissent sur un mode continu ou s'agit-il d'un processus discret au cours duquel la solution fait suite à une reconfiguration soudaine liée à une nouvelle perception globale (Welling, 2007) ?

Dans le projet EcCoGen, nous ne prendrons pas partie en faveur de l'une ou l'autre hypothèse, mais nous suivrons une voie qui pourrait s'avérer "moyenne", entre continuité et discontinuité. Pour le faire, nous faisons appel à un chercheur en sciences de gestion qui a produit une représentation du processus innovant tout à fait éclairant (Midler, 1996).

Le schéma de la Figure 14 indique que toute innovation met en place une phase de créativité, suivie d'une phase de contrôle puis d'une phase de réalisation. Gérer un projet d'innovation, c'est donc, selon Midler, partir d'un état dans lequel tout est possible – puisque rien n'est encore défini dans le projet – pour arriver dans un état où toute liberté créatrice est perdue puisque le projet est défini. Tout l'art de la gestion de projet consiste à fermer plus ou moins rapidement l'espace des possibles (celui de la créativité notamment) selon le degré d'innovation attendu ou encore selon le temps dont on dispose pour le projet. Cette représentation met donc l'accent sur une dimension très peu prise en compte dans les modèles de la créativité : la contrainte de temps.

A la lumière de ce que nous avons décrit dans cette partie, on peut considérer que ce schéma indique que la phase de créativité proprement dite consiste à favoriser l'expression d'une pensée divergente et est propice aux évolutions de type "illumination", ce que symbolise le caractère non-continu des courbes symbolisant les degrés de liberté sur le projet et le niveau de connaissance. Par la suite, la phase de contrôle renvoie plutôt à une pensée convergente, car il s'agit d'évaluer la solution générée. Pour autant, la progression ne devient pas linéaire pour autant car, même dans cette phase de contrôle (et même dans la phase finale de réalisation), la connaissance du produit progresse par à-coups. Ainsi donc, la créativité ne consiste pas seulement à produire des idées nouvelles, mais également à les contrôler, à les évaluer, ce que nous voyons dans la partie suivante.

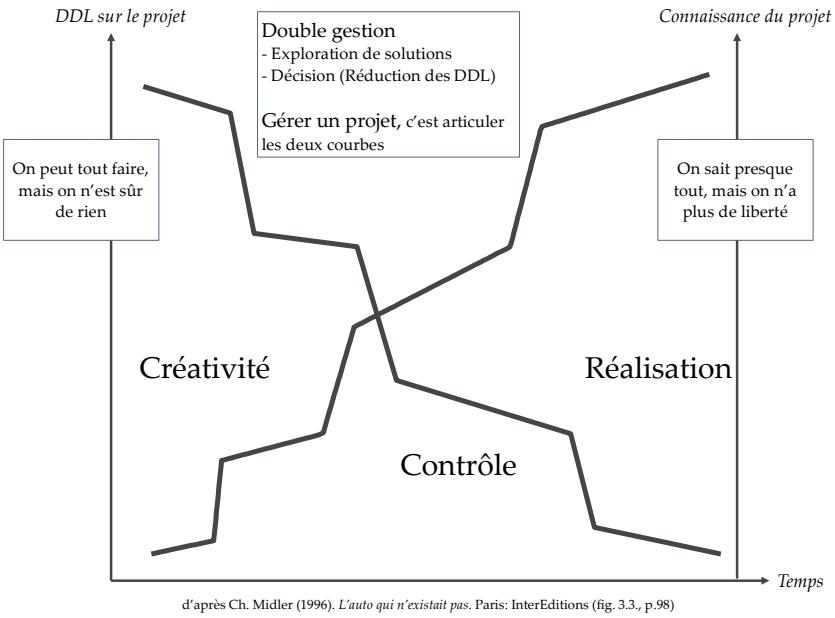

DDL sur le projet
Double gestion
- Exploration de solutions
- Décision (Réduction des DDL)
Gérer un projet, c'est articuler les deux courbes
Connaissance du projet
On peut tout faire, mais on n'est sûr de rien
On sait presque tout, mais on n'a plus de liberté
Créativité
Réalisation
Contrôle
Temps
d'après Ch. Midler (1996). L'auto qui n'existait pas. Paris: InterEditions (fig. 3.3., p.98)

Figure 24. Processus d'innovation selon Midler (1996).

3.4.3 MÉTHODES D'ÉVALUATION DE LA CRÉATIVITÉ / CONCEPTION CRÉATIVE

Les modèles décrits aux points 4.4.2.6 et 4.4.2.9 concernent plus particulièrement la créativité en tant que processus et compétence d'un individu donné. La discussion immédiatement précédente, portant sur la gestion de projet innovant, nous amène à évoquer les apports de la psychologie ergonomique sur la question de la créativité. C'est particulièrement l'objet de l'ouvrage de Bonnardel (2006), ce qui nous amènera à présenter les méthodes de cette discipline au cours de cette troisième partie consacrée aux méthodes d'évaluation de la créativité et de la conception créative. Nous présenterons rapidement les tests de créativité pour présenter ensuite les diverses méthodes mises en place dans le cadre d'un modèle multivarié. Nous poursuivrons en nous rapprochant des méthodes héritées de l'ergonomie et du CSCW[29], en glissant de l'évaluation de la créativité à celle de la conception créative qui sera préférentiellement mise en œuvre dans le projet EcCoGen. Nous justifierons ce choix.

3.4.3.1 MÉTHODES "CLASSIQUES" D'ÉVALUATION DE LA CRÉATIVITÉ

Par méthodes classiques d'évaluation de la créativité, nous faisons référence à des techniques fréquemment utilisées et explicitement centrées sur la créativité. La première d'entre elles est la pratique du test ou du questionnaire de créativité, les suivantes sont celles qui tournent autour de l'analyse de protocoles verbaux.

3.4.3.1.1 TESTS ET QUESTIONNAIRES

[29] *Computer Supported Cooperative Work*, domaine qui s'intéresse à l'utilisation des technologies numériques au sein de collectifs de travail et à leurs effets en termes individuels, sociaux, organisationnels.

Pour mesurer la créativité des sujets, il est courant de recourir à des tests ou à des questionnaires.

3.4.3.2 DIVERSES TECHNIQUES DE MESURES

On trouve de tels questionnaires portant sur les activités créatrices dans les travaux de Lubart et d'Amabile. Il s'agit d'évaluations par des juges, par des pairs ou en auto-évaluations, d'échelles de type Lickert, d'échelles de personnalité.

L'accent est mis, selon les cas, sur les caractéristiques de l'individu, sur ses productions ou sur l'environnement de travail, conformément aux modèles compositionnels défendus par ces auteurs. L'avantage de ces tests, selon Lubart (2003), est qu'on peut en mesurer, comme pour tout test, la sensibilité, la fidélité et la validité.

On peut encore citer la méthode KEYS d'Amabile qui est un outil dédié à l'évaluation des environnements de travail dans ce qu'ils favorisent ou inhibent la créativité. Il s'agit d'une enquête constituée de 78 items.

– 49 items sur les stimulants à la créativité (sur l'organisation, les systèmes de gratifications, les encouragements, le soutien, le travail en groupe, la liberté d'action ou encore les ressources) ;

– 19 items sur les obstacles à la créativité (ce qui entrave la créativité, par exemple la peur du risque, les obstacles organisationnels, la pression sur la charge de travail) ;

– 10 items sur les productions (aspects créatifs notamment).

3.4.3.3 TEST DE LA PENSÉE CRÉATIVE (GUILFORD, TORRANCE)

Plusieurs tests de pensée créative existent dans la littérature. Ils portent généralement sur des aspects cognitifs de la créativité. Le test de la pensée divergente de Guilford repose sur trois indicateurs : la *fluidité* (capacité à fournir un grand nombre de réponses), la *flexibilité* (capacité à fournir plusieurs catégories de réponses) et l'*originalité* (capacité à produire des réponses rares). Ce type de test est très utilisé pour évaluer la créativité, mais des critiques font part du fait qu'il ne permet pas vraiment de prédire la créativité ou encore que les mesures produites sont des mesures de potentiel de créativité et non de créativité effective, ce qui atténue la critique précédente (Runco, 1991). Enfin, la question de la généricité du test est posée : la mesure de créativité vaut-elle au-delà de la tâche donnée (Lubart, 2003) ?

En appui sur le test de Guilford, celui de Torrance (TTCT, pour *Torrance Test of Creative Thinking*) est certainement le plus répandu. L'objectif de Torrance était de construire un outil qui permette non seulement de mesurer les potentialités créatrices d'un individu, mais aussi de stimuler la pensée créatrice elle-même. Le TTCT repose sur quatre dimensions :

– la *fluidité* (nombre de réponses pertinentes) ;

– la *flexibilité* (nombre de catégories de réponses pertinentes) ;

– l'*originalité* (rareté des réponses données, en termes statistiques) ;

– l'*élaboration* (qualité des détails dans les réponses).

Le TTCT est construit sur des tâches verbales et figuratives relativement simples qui implique la mise en œuvre de la pensée divergente (Sternberg & Lubart, 1996 ; Zeng, Proctor, & Salvendy, 2011). La partie verbale est constituée de sept activités :

– *Asking* (poser des questions pour s'assurer de ce qui est produit dans le dessin à commenter) ;

– *Guessing causes* (trouver des causes possibles portant sur l'action montrée dans le dessin) ;

– *Guessing conséquences* (lister les conséquences possibles résultant de cette action) ;

– *Product improvement* (énumérer des façons originales, intéressantes qui permettront de provoquer plus d'amusement avec un éléphant-jouet) ;

– *Unusual uses* (penser à diverses utilisations de boîtes en carton) ;

– *Unusual questions* (poser des questions à propos des boîtes en cartons) ;

– *Just suppose* (évoquer des choses qui se produiraient dans une situation improbable, telle que des nuages attachés par des cordes qui pendraient jusqu'à terre).

Ces activités mettent en œuvre ce qui fait l'essence de la pensée créatrice, notamment scientifique : la curiosité. Elles sont supposées mesurer la puissance divergente, la capacité d'évocation.

La partie figurative est composée de trois activités :

– *Picture construction* (faire un dessin à partir d'une forme donnée, une larme, et lui donner un titre) ;

– *Picture completion* (ajouter des lignes à des figures incomplètes et donner des titres aux dessins) ;

– *Parallel lines* (produire une image à partir de lignes droites et donner des titres).

L'objectif de ces activités picturales est d'évaluer la capacité des sujets à trouver des finalités aux objets proposer et de les réaliser de diverses manières, ce qui met en jeu la capacité à structurer et à intégrer des éléments donnés.

Les deux parties, verbales et figuratives, sont complémentaires. Leur faible corrélation tend à montrer qu'elles mesurent des choses différenciées. En outre, la partie figurative permet de faire passer le test, au moins en partie, à des personnes qui ont des difficultés verbales, que cela relève de la maîtrise de la langue, de difficultés d'expression ou plus simplement qu'il s'agisse d'enfants en bas âge. La partie figurative permet de mesurer les dimensions *originalité* et *élaboration* sur la première activité et les dimensions *fluidité* et *flexibilité* sur les tâches 2 et 3, celles de complétion et de lignes parallèles. La partie verbale porte sur les dimensions de *fluidité*, *flexibilité* et *originalité*, mais n'est pas pertinente pour l'*élaboration*. La durée du test est d'environ 45 minutes pour la partie verbale et d'environ 30 minutes pour la partie figurative.

3.4.3.4 CRITIQUES DES TESTS DE LA PENSÉE CRÉATIVE

Runco, Acar et Cramond (2010) présentent les résultats d'une étude portant sur les cinquante années d'utilisation du TTCT. Leur conclusion principale est que ce test demeure solide à l'heure actuelle, même s'ils remarquent qu'il est plus approprié pour des performances individuelles que pour des performances publiques. Leurs analyses les amènent également à faire l'hypothèse qu'il y a un optimum dans la pensée divergente au-delà duquel le sujet pourrait se perdre dans des idées trop farfelues et finalement inutiles. Ils font référence à Eysenck qui rapporte que les individus psychotiques peuvent faire preuve d'une pensée divergente très importante, mais qu'ils ne sont pas créatifs pour autant car celles-ci sont en réalité trop irréalistes. Les auteurs préconisent en conséquence de travailler sur la définition d'un tel niveau optimum de pensée divergente dans l'objectif d'en faire un indicateur pour la formation à la créativité. De façon

générale, les résultats de cette étude soulignent la valeur de la pensée divergente dans la production créative. D'après les auteurs, les enseignants, formateurs, parents devraient encourager ce type de pensée, que ce soit pour créer ou tout simplement dans la vie quotidienne.

De façon générale, le TTCT est fréquemment utilisé parce qu'il est assez facile à administrer, y compris sur des échantillons de gens "ordinaires", et qu'il donne des scores relativement objectifs (Sternberg & Lubart, 1996). Cependant, au chapitre des critiques, Sternberg et Lubart pointent le fait que les tests papier-crayon ont des limites qui peuvent obérer la mesure de la créativité. Il conviendrait, par exemple, de travailler sur des productions plus significatives pour les individus, et notamment des productions professionnelles. C'est également sur ce même terrain que porte la critique de Zeng *et al.* (2011) qui notent que si les tests de pensée divergente sont un outil incontournable pour mesurer le potentiel créatif des individus, il convient cependant de vérifier que ces tests sont fiables pour évaluer la créativité effective, celle qui a lieu dans les environnements de travail.

Un autre volet de critiques porte sur le fait que la rareté statistique (pour l'originalité) n'est pas très fiable car rareté ne signifie pas qualité. Enfin, le TTCT est un test générique qui pose la question de la mesure de la créativité chez des individus dont c'est le métier ou la pratique, ou qui sont en formation.

3.4.3.4.1 ANALYSES DE PROTOCOLES

Depuis quinze à vingt ans, une technique émerge fortement du côté de la psychologie cognitive et de l'ergonomie pour analyser les situations de conception créative : l'analyse de protocoles verbaux (Caverni, 1988 ; Cross, Christiaans, & Dorst, 1996 ; Darses, 2006 ; Détienne, 2002 ; Dorst & Cross, 2001 ; Purcell & Gero, 1998). Il s'agit d'une technique qui consiste à demander au concepteur de commenter à haute voix ses propres actions dans la réalisation d'une tâche (verbalisations concomitantes). Cette verbalisation ainsi que les productions du sujet sont enregistrées, le plus souvent en vidéo, à des fins d'analyse. Malgré une critique de taille qui consiste à soutenir qu'en verbalisant, le sujet modifie l'exécution de la tâche ainsi que sa propre performance, voire qu'on ne peut pas prétendre atteindre les processus cognitifs par une étude de la verbalisation, cette technique reste très utilisée en ergonomie de la conception. Selon ses promoteurs, les protocoles verbaux relèvent d'une méthodologie valide dans la mesure où ils respectent les canons de la scientificité, à savoir l'explicitation et la reproductibilité. Cette méthodologie est très majoritairement appliquée pour l'analyse de l'activité d'un *concepteur agissant seul*, raison pour laquelle il lui est demandé de parler à haute voix.

3.4.3.5 PRODUIRE DES CATÉGORIES VERBALES, ARGUMENTATIVES

Les verbalisations produites peuvent être catégorisées en type d'échanges argumentatifs (Darses, 2006). Dans le cas qu'elle étudie, Darses caractérise ces arguments en tant qu'ils fournissent des critères pour les opérateurs, qu'ils décrivent des procédures, des dispositifs de travail ou encore des types de solutions possibles. Les résultats montrent que les critères tiennent une place centrale dans la conception créative, notamment lors de la phase de recherche de solutions. En revanche, ce sont plutôt des arguments liés aux modes opératoires de l'activité qui sont mobilisés lorsque les opérateurs sont en phase d'analyse du problème à résoudre. Les critères ne sont donc pas utiles pour les concepteurs lorsqu'il s'agit de comprendre le problème, ils le sont en revanche lorsqu'il faut argumenter les solutions en émergence. Ces résultats sont intéressants à considérer lorsqu'il s'agit de penser des systèmes d'assistance à l'argumentation ou à la décision, notamment en situation de travail collectif.

L'analyse des productions verbales, produites pendant la session ou après comme c'est le cas pour Lebahar (2007) met en exergue le fait que l'argumentation produite par les concepteurs est pour eux un moyen de se saisir du problème, de le comprendre, d'analyser l'espace de conception, de construire des hypothèses, de développer un processus de confrontation de points de vue et de délibération aboutissant à la prise de décision. L'argumentation forme le prisme au travers duquel les conjectures seront analysées, discutées,

évaluées, rejetées ou choisies. Au fur et à mesure des arguments construits, de façon individuelle ou collective, c'est un espace d'explications, de justifications, de mise en exergue de contraintes techniques, professionnelles ou encore liées à l'utilisation future du produit qui est créé, espace qui fonde la création de référentiels communs. L'argumentation, surtout lorsqu'elle se produit dans un cadre collectif, permet donc la réunion de points de vue et la convergence progressive vers une solution commune.

3.4.3.6 IDENTIFIER DES PHASES DE CONCEPTION LIÉES À LA CRÉATIVITÉ

L'analyse de protocoles verbaux permet également de distinguer des phases dans les cycles de conception. Définir et cadrer le problème de conception à résoudre est un aspect déterminant de la créativité. Les stratégies mises en œuvre par les concepteurs peuvent être diverses pour le faire (Dorst & Cross, 2001). Par exemple, certains commencent par évaluer le type de tâche à laquelle ils font face (est-ce une tâche de conception ou de reconception ?), d'autres se concentrent sur un élément qui leur semble prioritaire, d'autres encore cherchent d'emblée à être originaux. L'interprétation de la tâche peut donc être différente selon les concepteurs, en fonction de la perception qu'ils ont de leur environnement, des ressources disponibles et de leurs capacités à concevoir quelque chose de nouveau. Malgré cette variabilité, la recherche d'un cadrage aux objectifs de conception reste constante dans les premiers temps de conception.

Cette observation n'est pas si triviale qu'il y paraît, car il ressort des analyses de protocoles que la conception créatrice ne consiste pas à déterminer le problème à résoudre dans un premier temps puis de chercher une solution satisfaisante pour y répondre. En réalité, la formulation du problème et la recherche de solutions (le raffinement) sont concomitants et l'on observe des analyses constantes de l'état courant, des synthèses et évaluations de ce qui est produit, ce que Dorst et Cross (2001) modélisent sous forme de co-évolution de l'espace-problème et de l'espace-solution, en soutenant qu'il s'agit là d'un modèle général de la conception. Cela rejoint la position de Darses (1997) selon laquelle les axes de phasages du projet et de raffinement de la solution avancent simultanément au cours du processus de conception, tandis que les concepteurs font en permanence, au cours du développement du produit, des allers-retours entre les niveaux abstraits et concrets de la solution en cours (Figure 15). Voir également Brassac et Gregori (2003) sur cette question, à propos notamment de la prise en compte des aspects liés à l'utilisation par les opérateurs.

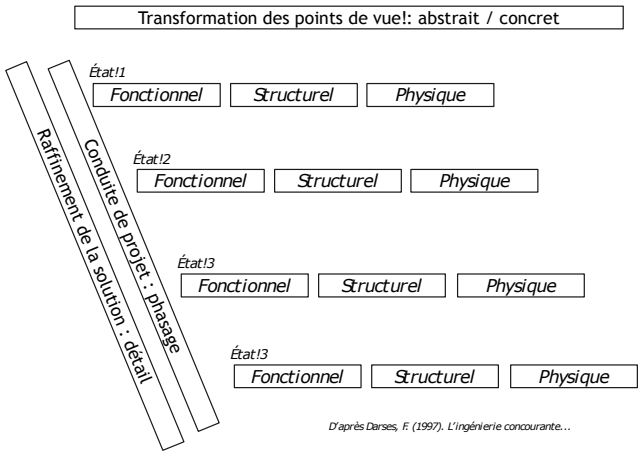


Figure 25. Développement de la solution en fonction des axes de phasages, raffinement et concrétisation. *D'après Darses (2007).*

3.4.3.7 ANALYSER LES PRODUCTIONS GRAPHIQUES, AU-DELÀ DE LA PRODUCTION VERBALE

Les protocoles de conception, dont un des plus cités est celui de Delft (Cross *et al.*, 1996), montrent un

certain nombre de régularités dans la manière dont les productions graphiques sont employées en tant qu'éléments de conception à part entière (Purcell & Gero, 1998). La difficulté est alors de dépasser la simple description de ce qui est produit. Purcell et Gero généralisent d'ailleurs cette critique à l'analyse même des protocoles verbaux en soulignant que les régularités mises en exergue sont en fait étroitement liées aux protocoles de conception eux-mêmes. L'objectif est alors d'établir des théories et des modèles à partir des observations et analyses produites, ce qui nécessite du temps.

Les dessins produits en situation par les concepteurs doivent être examinés de près car ils soulagent la mémoire de travail, ils renvoient à un langage figuré dont les significations sont multiples, ils forment des synthèses créatrices (Purcell & Gero, 1998). Ce sont des outils qui servent pour la construction de références communes, pour le contrôle ou encore pour la simulation (Lebahar, 2007). Ce sont également des *objets intermédiaires* fondamentaux dans le processus de conception qui ont une triple fonction : représenter, traduire, médiatiser (Jeantet, 1998 ; Vinck, 1999).

Dans un ouvrage consacré la conception architecturale, Lebahar (2007) demande à des architectes de commenter les dessins qu'ils ont produits au cours de leur activité créative. Leur impression spontanée est que le dessin leur permet de désigner des référents ou encore de contrôler visuellement la conformité d'un objet qu'ils ont imaginé par rapport aux contraintes qu'ils doivent satisfaire, par exemple celles provenant du cahier des charges. Selon Lebahar, le dessin d'architecte, mais plus généralement le dessin en conception, est un moyen de simulation qui permet au sujet d'évaluer des hypothèses qu'il fait, alors même qu'il n'est pas encore "sûr" de ce qu'il veut produire. Le dessin peut également être un moyen commode de décrire des relations entre des éléments sans encore donner de forme à l'objet.

En psychologie ergonomique, les brouillons, dessins, graphiques, calculs, tableaux, notes, ainsi que les documents préalables et les prototypes sont le plus souvent considérés comme des représentations externes permettant d'assister la conception créative (Bonnardel, 2006). C'est également la position défendue par Visser, Darses et Détienne (2004), qui, tout en faisant référence à la notion d'artefacts cognitifs de Norman (1993), soutiennent que ces objets (les brouillons, documents, etc.) sont des supports de l'activité, des ressources que le concepteur peut convoquer à sa guise et qui possèdent des caractéristiques objectives. D'après ces auteurs, ces représentations externes *« amplifient les capacités de traitement de l'information du concepteur »* (2004, p. 109). Dans un autre texte portant également sur des situations de conception, Détienne *et al.* (2006, p. 287) écrivent qu'« *en fournissant des informations sur la solution, [les traces graphiques] permettent aux concepteurs de découvrir de nouveaux aspects de celle-ci »*. Ces traces permettent alors de construire des référentiels communs au sein du collectif, référentiels partagés par les concepteurs et autorisant le développement de la conception de l'artefact considéré.

Les auteurs ajoutent que l'analyse de l'activité graphico-gestuelle complète l'analyse des interactions verbales en donnant des informations supplémentaires (et d'une autre nature) qui seraient inaccessibles par la prise en compte de la seule activité verbale. En outre, les gestes et les "dessins" expriment de l'incertain, des choses que le discours ne peut pas donner. Ils permettent par exemple de simuler des objets, de "modéliser" des solutions que le discours ne saurait signifier. Ainsi, ces productions graphiques et gestuelles font apparaître d'autres significations, que le discours n'avait pas produit, ou du moins pas explicitement. Cette analyse de l'intrication entre les inscriptions et le développement de la solution est stimulante et souvent convaincante. Elle reste cependant très marquée par le caractère objectif des "représentations externes".

Salembier (2002) conçoit également les productions graphiques comme autant de représentations externes, mais d'une façon plus convergente avec les théories de l'action située et de la cognition distribuée. Il insiste sur le caractère inextricablement mêlé des productions graphiques et des cognitions. D'autres auteurs défendent ces mêmes positions, par exemple Rabardel (2005) pour qui l'activité cognitive est subordonnée à la capacité de l'individu d'intervenir dans le monde, que ce soit par le langage, l'écriture ou par tout autre moyen d'inscription. Ainsi, les individus mobilisent des ressources internes et externes (eux-mêmes, les objets, les documents...) qui donnent forme à leurs rapports au monde.

3.4.3.7.1 DIVERSIFIER LES TECHNIQUES

Dans un projet récent et assez proche d'EcCoGen au sens où il associe des laboratoires d'architecture et de psychologie ergonomique et qu'il porte sur la production d'esquisses architecturales (ANR CoCréa), diverses méthodes d'analyses ont été mobilisées pour analyser les aspects collaboratifs de la conception d'un dispositif numérique de collaboration à distance, le Studio Digital Collaboratif (SDC), associant le logiciel *SketSha* avec un système de visioconférence (Lecourtois *et al.*, 2010). Il s'agissait, dans ce projet, de favoriser un travail à distance synchrone soutenu par des interactions multimodales (parole, gestes, productions graphiques). Ainsi, les auteurs ont-ils mis en place les moyens suivants pour le développement et l'analyse de l'utilisation de leur dispositif :

– des observations *in situ*, c'est-à-dire dans les agences d'architectes participant au projet, durant quatre mois, accompagnés d'enregistrements de l'utilisation du SDC ;

– une observation longitudinale portant sur l'usage du SDC dans une agence en particulier ;

– une expérimentation en laboratoire, dans laquelle des binômes d'architectes habitués à travailler ensemble, devaient travailler sur des exercices prédéterminés.

Cette manière de procéder est très intéressante car elle permet de multiplier les points de vue, puis de faire des hypothèses qui sont "testées" par la suite.

3.4.3.8 VERS UNE ASSISTANCE DE LA CRÉATIVITÉ / CONCEPTION CRÉATIVE

Les travaux que nous venons de présenter ont souvent pour fonction de développer des assistances pour la conception créative (Bonnardel, 2006 ; Hoc & Darses, 2004 ; Rabardel & Pastré, 2005). Voir aussi le numéro spécial de l'*International Journal of Human-Computer Studies*, numéro 63 de 2005, consacré à la créativité assistée par ordinateur.

3.4.3.8.1 ASSISTANCE PAR L'ORDINATEUR

Pour Bonnardel (2006), les assistances portent essentiellement sur la facilitation de l'évocation d'idées créatives, de l'évaluation et du rapport aux représentations externes. Ce sont des formes d'assistance informatiques, raison pour laquelle nous les développons plus particulièrement ici.

3.4.3.9 FACILITER L'ÉVOCATION D'IDÉES CRÉATRICES

L'objectif poursuivi ici est de favoriser l'évocation d'idées en partant du constat que, dans les situations créatives, les sujets, même lorsqu'il s'agit de spécialistes, peuvent effectuer des recherches insuffisantes. Les techniques auxquelles il est possible de faire appel sont pour certaines des techniques classiques en créativité : *brainstorming*, groupes de discussion (ou *focus group*). Ce peut être aussi des techniques mettant en place des interactions avec des systèmes à base de connaissances spécialisés.

3.4.3.10 FACILITER L'ÉVALUATION

Faciliter l'évaluation consiste à permettre au concepteur, ou au créatif, de vérifier que la solution qu'il développe est adaptée au problème posé et à l'environnement dans lequel elle sera déployée. C'est une fonction complexe à mettre en œuvre car elle doit être adaptée au niveau d'expertise du concepteur (novice ou expert), mais dépend aussi du domaine d'expertise lui-même. Des travaux réalisés par Bonnardel et des collaborateurs tendent à montrer que l'affichage de messages critiques dans le cours de la conception

amènent les concepteurs à modifier leurs solutions en développement. L'influence serait directe sur les concepteurs débutants (qui ont reçu davantage de messages) et indirecte sur les concepteurs confirmés au sens où cela « les a incités à rechercher les déficiences potentielles des solutions envisagées avant même de les représenter graphiquement » (2006, p. 156).

3.4.3.11 FACILITER LE RAPPORT AUX REPRÉSENTATIONS EXTERNES

Bonnardel (2006, p. 140) parle de « faciliter la "conversation réflexive" entre le concepteur et des représentations externes créées, notamment avec un système de CAO ». En écho aux travaux de Lebahar (1983 ; 2007), Bonnardel note que le dessin est un moyen intuitif et rapide de proposer une solution et qu'il donne la possibilité d'évoquer des aspects détaillés assez tôt dans le processus de conception.

3.4.3.11.1 ASSISTANCE DANS LE CADRE DE LA FORMATION

Une étude Mathisen et Bronnick (2009)porte sur les effets de la formation à la créativité sur ce que nous traduisons par "propre-efficacité créatrice" (*creative self-efficacy*). Comme bien d'autres, les auteurs partent du constat que bien des facteurs individuels et contextuels agissent sur la performance créative. Selon eux, un concept est cependant central : la propre-efficacité créatrice, qui renvoie à la croyance que les individus peuvent former sur leur propre capacité à produire des résultats créatifs. C'est un concept issu de la psychologie sociale de Bandura (*self-efficacy*) selon lequel chacun peut avoir l'impression qu'il va réussir dans telle ou telle situation. Cette croyance en sa propre efficacité créatrice peut alors suppléer les difficultés inhérentes à toute création : durée, effort, risque d'échec, etc.

Les auteurs formulent cinq hypothèses.

1. Il existe une relation positive entre la propre-efficacité créative et la performance créative.
2. Les sujets qui reçoivent une formation à la créativité développeront une propre-efficacité créative plus importante que ceux qui reçoivent une formation aux statistiques et aux mathématiques[30].
3. Les sujets qui reçoivent une formation à la créativité de cinq jours développeront une propre-efficacité créative plus importante que ceux qui auront une formation d'un seul jour.
4. Les sujets provenant d'une organisation professionnelle (des employés municipaux) développeront une propre-efficacité créative plus importante que des étudiants.
5. L'effet de la formation à la propre-efficacité créative n'aura pas diminué deux mois après la fin de la formation.

La formation à la créativité était composée de présentations théoriques, de discussions et de démonstrations, sur la base du modèle compositionnel d'Amabile (compétences spécifiques, compétences créatives générales, motivation). Les sujets étaient ensuite confrontés à des techniques créatives. Enfin, les sujets étaient amenés à créer un cours sur la créativité qu'ils auraient à administrer. La formation en un jour est une version condensée de la formation en cinq jours, mais repose sur les trois mêmes composantes.

La "propre-efficacité créative" a été mesurée avant et après la formation. Les résultats que la formation a un effet positif sur la croyance des sujets à produire des résultats créatifs. Alors que les sujets du groupe contrôle ont des résultats stables avant et après la formation, ceux qui ont une une formation, et plus encore ceux qui ont eu une formation de cinq jours, voient leurs scores évoluer positivement de façon significative. Enfin, le score ne faiblit pas deux mois après la formation, ce qui tend à montrer le poids de la formation dans l'auto-perception des sujets.

Ainsi, selon Mathisen et Bronnick, il est possible non seulement de former à la créativité, mais de le faire de sorte que la confiance des sujets en leurs capacités soit robuste. Les conséquences sont qu'il est important, dans le cadre d'une formation à la créativité, de comprendre les facteurs qui influencent la motivation des formés et qui les engagent dans un processus créatif. En effet, en développant une impression de "propre-efficacité créative", c'est-à-dire en assistant les sujets sur leurs compétences créatives, on leur permet de se comporter de façon créative, on développe leur volonté à y parvenir et on les préserve des difficultés liées à l'éventuelle longueur de la tâche. La présente étude suggère que pour développer ce sentiment chez les

[30] Groupe contrôle qui, au lieu de ne recevoir aucune formation, en reçoit une qui est sans lien avec l'objectif de mesure.

individus, il convient de :
– proposer des expériences dans lesquelles ils pourront exercer leur maîtrise de la créativité ;
– leur donner l'occasion d'observer des créatifs expérimentés utiliser des outils de création avec succès ;
– les convaincre par l'argumentation qu'ils possèdent effectivement de telles capacités créatrices.

3.4.3.11.2 QUATRE CATÉGORIES D'ASSISTANCES

En synthèse de ce point sur les assistances, nous nous référons à Lubart (2005) qui propose de catégoriser l'ensemble des contributions au numéro spécial de l'*IJHCS* cité en chapeau de ce point selon quatre fonctions qu'il identifie et donne à l'ordinateur dans sa relation avec le créatif.

3.4.3.12 NOUNOU (COMPUTER AS NANNY)

L'ordinateur soutient le travail du créatif, parfois long et empli de doute. Les plages durant lesquelles l'ordinateur calcule peuvent être utiles pour le créatif, favorisant l'incubation des idées. Mais ce peut être aussi lié au fait que l'ordinateur guide l'utilisateur en lui permettant de manipuler ou de représenter ses idées plus ou moins facilement.

3.4.3.13 CORRESPONDANT (COMPUTER AS PEN-PAL)

L'ordinateur permet au créatif de communiquer ses idées à d'autres, notamment au sein de communautés et plus encore quand les équipes sont à distance ou quand elles sont composées d'experts représentants diverses spécialités et des logiques hétérogènes.

3.4.3.14 ENTRAÎNEUR (COMPUTER AS COACH)

En tant que système-expert, l'ordinateur assiste le créatif en lui permettant par exemple de s'entraîner à la pensée divergente, à la pensée par analogie ou encore à produire des associations libres, bref, lorsqu'il fournit au créatif des aides sur les processus cognitifs en jeu dans la créativité.

3.4.3.15 COLLÈGUE (COMPUTER AS COLLEAGUE)

L'ordinateur n'est plus simplement un fournisseur de ressources comme dans les trois cas précédents, mais qu'il s'avère être un véritable partenaire du créatif.

C'est certainement cette dernière ambition qui est celle du projet EcCoGen.

3.4.3.16 ANALYSE DE L'ACTIVITÉ ET PRISE EN CONSIDÉRATION DE L'ENVIRONNEMENT

La conception est une activité collective dans bien des cas. Il est alors nécessaire de mettre en place des méthodologies prenant en compte cette dimension, ce qui n'est généralement pas le cas dans les techniques que nous avons évoquées au point précédent, excepté dans le cas du projet CoCréa. En outre, le poids du contexte, de l'environnement, des technologies est de plus en plus souvent mis en avant, notamment dans les travaux de type CSCW. Les théories dites de l'action située (Suchman, 1987) ou de la cognition distribuée

(Hutchins, 1995) s'imposent progressivement et nécessitent de dépasser la simple analyse de protocoles verbaux telle qu'elle a été mobilisée jusqu'à présent en ergonomie. L'effort porte désormais, en ergonomie, sur l'analyse des dialogues coopératifs (Détienne, 2002), y compris dans leurs dimensions graphiques et gestuelles (Visser *et al.*, 2004) ; (Visser & Détienne, 2005). Plus fondamentalement, c'est tout un pan de l'ergonomie et de la sociologie du travail et des organisations qui opère une sorte de changement de paradigme pour analyser l'activité en ce qu'elle est fondamentalement ancrée dans la situation et liée aux artefacts (Baker, Greenberg, & Gutwin, 2002 ; Borzeix & Cochoy, 2008 ; Clot & Leplat, 2005 ; Dourish, 2003 ; Kaptelinin & Nardi, 2006 ; Rabardel & Pastré, 2005 ; Salembier & Pavard, 2005 ; Theureau, 2010).

3.4.3.16.1 LA CLINIQUE DE L'ACTIVITÉ

L'objectif global des analyses que l'on peut regrouper sous le terme "clinique de l'activité" est de faire le lien entre l'activité des individus, essentiellement dans un cadre professionnel puisque nous sommes en ergonomie, et le genre, concept qui renvoie aux « manières de prendre les choses et les gens stabilisés au moins temporairement dans un milieu de travail donné » (Clot & Leplat, 2005, p. 308). Derrière le syntagme *clinique de l'activité*, il faut également entendre des méthodes d'analyse dont le principe général repose sur l'analyse de cas que l'on décrit finement afin d'en faire resurgir toutes les significations, et plus particulièrement celles qui ne sont pas directement accessibles, ni par un observateur non-averti, ni par le sujet lui-même. Plus qu'à une technique, la clinique de l'activité renvoie à une approche globale, à une posture de recherche qui :

« 1/ (...) considère son objet d'étude dans *sa globalité*.

2/ (...) a un caractère *approfondi* et examine son objet dans toute sa complexité.

3/ (...) accorde une importance particulière au rôle du (ou des) *sujet(s)*. » (2005, p. 292).

Cette approche n'est pas sans lien avec ce que nous avons présenté précédemment car les observables[31] sont parfois directement issus de protocoles au sens du point 4.4.2.13.1. Nous présentons à présent des manières de procéder en clinique de l'activité.

3.4.3.16.2 ANALYSES PRODUITES EN CLINIQUE DE L'ACTIVITÉ

3.4.3.17 PRISE EN COMPTE DES ASPECTS ÉMOTIONNELS ET ENVIRONNEMENTAUX

Certains travaux que l'on peut classer dans cette veine méthodologique proposent d'intégrer les aspects cognitifs, souvent perçus comme rationnels et finalisés, aux aspects relationnels, sociaux, émotionnels (Cahour, 2002). Ce qui permet de rendre compte non seulement du développement du produit lui-même, mais également des modalités selon lesquelles les concepteurs prennent ou non les autres points de vue en considération et, cela, en fonction de l'environnement de conception, plus ou moins industriel par exemple, et des objectifs de conception.

Ces "traces" émotionnelles et environnementales sont notamment étudiées dans le cadre d'études portant sur l'utilisation de technologies, notamment au moyen de capteurs (Cahour & Licoppe, 2010)[32]. Cela permet par la suite de les analyser pour elles-mêmes ou de les soumettre aux sujets eux-mêmes afin qu'ils les commentent.

[31] La démarche clinique, portant sur des observations réalisées dans des situations de travail effective et n'étant pas expérimentale au sens de "produite dans un laboratoire", préfère le terme d'observables à celui de données pour qualifier les productions sur lesquelles elle porte son regard.

[32] Pour la capture des émotions, voir le site : http://emotionalcartography.net/EmotionalCartography.pdf

3.4.3.18 ENTRETIENS D'AUTO-CONFRONTATIONS

L'auto-confrontation est une méthode de l'ergonomie qui consiste globalement à confronter un sujet à sa propre activité (Clot, Faïta, Fernandez, & Scheller, 2000) dans l'objectif d'inventorier les informations jugées pertinentes par l'opérateur et de comprendre les processus cognitifs qu'il met en jeu ainsi que ses logiques d'action. Pour le faire, il est nécessaire pour l'analyste de s'acculturer au milieu professionnel qu'il va investiguer. Les séquences qui seront filmées afin de permettre les auto-confrontations doivent être choisies avec le collectif étudié et non pas imposées par l'analyste ; ceci afin de travailler sur des observables valides. Selon les cas, les séquences en question dureront quelques minutes à plusieurs heures.

L'auto-confrontation peut être "simple" ou "croisée". Dans le premier cas, la confrontation se déroule entre l'opérateur concerné et l'analyste, qui joue un rôle d'animateur dans la discussion. Dans le second cas, l'interaction a lieu entre pairs, l'analyste étant en retrait, mais présent tout de même pour assurer le déroulement de la séance. Chacun des deux pairs a été filmés et va devoir alternativement discuter sa propre activité et celle de son collègue, ce qui nécessite que les séquences portent sur des activités similaires.

L'intérêt des auto-confrontations dites croisées est qu'elles ont une influence sur le discours des opérateurs. En s'adressant à un pair plutôt qu'à une personne extérieure (auto-confrontation simple), ceux-ci livrent une description différente de leur réel. Alors que dans les auto-confrontations simples, le discours est plutôt descriptif, dans les auto-confrontations croisées il devient un instrument pour amener l'autre (le pair) à penser et à agir selon une logique-métier.

Dans un article récent, Theureau (2010) positionne l'entretien en auto-confrontation parmi les techniques de verbalisations que l'on peut rencontrer en ergonomie, y compris l'analyse de protocoles verbaux décrite au point 4.4.2.13.1. Quatre classes de méthodes sont identifiées :

– la verbalisation concomitante (analyse de protocoles) ;

– l'auto-confrontation à des enregistrements de l'activité du sujet ;

– l'entretien de remise en situation par des traces matérielles de l'activité ;

– l'entretien de remise en situation par des traces de l'activité internes (dans le corps même) du sujet[33].

Sur ces quatre techniques, seules la première consiste en une documentation immédiate de l'activité par le sujet. Dans les trois autres cas, il s'agit d'une documentation différée. Les méthodes 2 et 3 portent sur des traces "extérieures" à l'individu, comme des résidus de son activité alors que la méthode 4 porte sur des traces internes, éventuellement intimes, de l'individus. Selon Theureau, le choix de l'une ou l'autre méthode doit être fait en fonction des objectifs du chercheur. S'il considère que la verbalisation ne contaminera pas ou ne rendra pas impossible l'activité, alors la méthode 1 peut être indiquée. Il y a des cas où il est difficile de filmer l'activité de l'opérateur sans perturber l'activité elle-même (la conduite automobile par exemple), ce qui rend la méthode de l'auto-confrontation plus difficile. Dans d'autres cas, on peut assez facilement avoir accès aux traces matérielles de l'activité (par exemple dans l'utilisation d'un dispositif numérique), ce qui rend la méthode 3 plus opérante.

Le programme de recherche de Theureau, qu'il nomme le « cours d'action », fait principalement appel à ces trois premières méthodes.

3.4.3.19 FOCUS SUR LES ACTIVITÉS NARRATIVES

[33] Pour des exemples concernant les deux derniers points, on peut se reporter à ce qui est évoqué au point précédent.

Dans un registre assez proche, il existe des techniques dites narratives qui consistent à recourir aux "histoires" que les individus "racontent" dans les organisations et qui participent activement au partage de la connaissance tacite au sein de ces organisations. Une technique s'est développée en ingénierie des connaissances qui vise à modéliser ces activités narratives : le *storytelling*[34] (Soulier, 2005). A travers des récits d'experts, le *storytelling* permet de faire apparaître des moments-clés dans les processus de décision et d'identifier les acteurs qui ont joué un rôle important pour une situation donnée. Le storytelling est donc une technique qui permet d'aller au-delà des compétences techniques souvent mises au centre des analyses. Sans qu'il y fasse référence, c'est un peu ce type de technique que Lebahar (1983 ; 2007) a mis en œuvre dans ses travaux sur le design architectural. Ainsi que le notent Bationo-Tillon, Folcher et Rabardel (2010, p. 64) : « [Lebahar] rappelle que l'activité créatrice est plus riche que ce que le dessin laisse apparaître. A notre sens, comprendre les activités narratives consiste également à établir des ponts entre les traces de la narration en train de se faire et ce qui est significatif pour le narrateur ».

D'une certaine manière, on peut également considérer que les outils du Web 2.0 sont des espaces dans lesquels les gens racontent des histoires qui pourraient être analysées comme telles. Cela dépasse le cadre du projet EcCoGen, mais pourrait être toutefois conserver en mémoire dans le cas où l'on souhaiterait implémenter des outils de type forum ou blogue dans le dispositif informatique.

3.4.4 SYNTHÈSE POUR LE PROJET ECCOGEN

3.4.4.1 ÉTUDIER LA CRÉATIVITÉ : UNE QUESTION LIÉE À L'USAGE DU DISPOSITIF NUMÉRIQUE

La clinique de l'activité en tant que cadre général portant des méthodes visant à se pencher sur ce qui se produit et sur ce qui est produit en situation constitue une voie féconde pour saisir au plus près les questions d'usages. Les méthodes décrites fournissent des ressources qualitatives importantes pour le chercheur qui souhaite comprendre la part non explicite, parfois non directement observable, de l'activité. Ce sont certes des méthodes assez lourdes en terme de dispositif d'enregistrement autant qu'en termes d'analyses (elles sont chronophages), mais on peut espérer que les résultats fournis soient théoriquement solides et empiriquement signifiants.

En tant que méthodes plaçant les traces de l'activité au centre de l'analyse, on peut également souligner qu'elles sont particulièrement adaptées pour les projets de type EcCoGen portant sur le développement d'un dispositif numérique. Enfin, ce sont des méthodes qui permettent d'étudier la coopération d'acteurs, dans la ligne des travaux du CSCW (Salembier & Pavard, 2005). L'accent n'est plus nécessairement mis sur la réalisation de la tâche, comme c'est souvent le cas en psychologie ergonomique cognitive, mais sur les conditions qui en permettent la réalisation. Ce sont donc, à ce titre, des méthodes qui travaillent sur la notion d'usage ou d'appropriation (Dourish, 2003) bien plus que sur celle d'utilisabilité.

3.4.4.2 PRÉCONISATIONS MÉTHODOLOGIQUES POUR ECCOGEN

Pour le projet EcCoGen, nous prévoyons de mettre en place des situations d'usage du dispositif numérique, dans une version prototype dans un premier temps (automne 2011), puis dans une version développée (automne 2012). Ces séances de travail, par binômes, seront filmées. Nous choisissons un travail en binômes (comme ce fut le cas d'ailleurs pour Lecourtois *et al.* (2010), sur l'hypothèse que les sujets sont ainsi amenés à se confronter naturellement l'un à l'autre, à négocier leur activité et, ainsi, à exprimer ce que Theureau (2010) qualifie de "conscience pré-réflexive" parce que cela impose aux sujets de prendre conscience de leur activité et, ce faisant, de transformer leur activité. Ils livrent ainsi des traces à la fois

[34] A ne pas confondre avec l'usage qui en est fait en communication politique notamment et vulgarisé dans un ouvrage de Christian Salmon en 2007.

verbales, gestuelles et matérielles à l'analyste. C'est là en outre une méthode que nous avons mise en œuvre récemment dans un atelier de design architectural (Fixmer, Chaabouni, Gregori, & Brassac, 2010) et plus anciennement dans un cadre pédagogique, en y ajoutant d'ailleurs des moments d'auto-confrontations (Hautecouverture, Gregori, & Brassac, 2007). Dans ce dernier cas, il s'agissait d'un projet de développement d'une plate-forme de coopération pour des enfants de primaires (en classe de CM2).

Nous préconisons également de construire et/ou d'utiliser un questionnaire existant pour examiner plus directement la question de l'assistance créative supportée par le dispositif numérique.

3.4.4.3 QUELQUES RÉFLEXIONS CONCLUSIVES... ET D'OUVERTURE

Enfin, nous concluons par quelques réflexions qui nous guident au sein du projet EcCoGen, à la lumière des théories, modèles et méthodes exposés dans cette revue de littérature.

– Dans quelle mesure les productions graphiques sont-elles des moyens de négocier avec la commande (consigne, cahier des charges, demande d'autrui...), avec autrui, mais aussi avec soi-même ?

– Quel est le rôle des ressources, interaction avec autrui, inscriptions, analogies... dans la réduction de l'incertitude au cours de l'activité de conception créative ?

– Comment les utilisateurs identifient-ils les ruptures et irréversibilités dans le processus créatif (ce que Lubart appelle "redirection") ? Comment les marquent-ils ? Quelles en sont les traces ?

– Peut-on identifier des "styles cognitifs" chez les différents binômes ? Quels sont les liens entre les styles cognitifs et les assistances proposées par le dispositif numérique ? Quelles en sont les conséquences du point de vue de la formation ?

– Peut-on identifier une trame générale dans l'activité des utilisateurs (des scénarios d'utilisation) ? Quel est le rôle des artefacts dans de tels scénarios ?

3.4.5 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Amabile, T. M. (1996). *Creativity in Context. Update to the Social Psychology of Creativity*. Boulder, CO: Westview Press.

Amabile, T. M., Goldfard, P., & Brackfield, S. C. (1990). Social Influences on Creativity: Evaluation, Coaction, and Surveillance. *Creativity Research Journal*, *3*(1), 6-21.

Baker, K., Greenberg, S., & Gutwin, C. (2002). Empirical Development of a Heuristic Evaluation Methodology for Shared Workspace Groupware. *Proceedings of CSCW'2002* (p. 96-105). New Orleans, Louisiana, November 16-20.

Bationo-Tillon, A., Folcher, V., & Rabardel, P. (2010). Les instruments transitionnels : une proposition pour étudier la diachronie des activités narratives. *Activités*, *7*(2), 63-83.

Boden, M. (1992). *The Creative Mind*. New York: Basic Books.

Bonnardel, N. (2006). *Créativité et conception. Approches cognitives et ergonomiques*. Paris: Solal.

Borillo, M., & Goulette, J.-P. (2002). *Cognition et création. Explorations cognitives des processus de conception*. Bruxelles: Mardaga.

Borzeix, A., & Cochoy, F. (2008). Travail et théories de l'activité: Vers des Workspaces Studies? *Sociologie du travail*, *50*, 273-286.

Brassac, C., & Gregori, N. (2003a). Une étude clinique de la conception collaborative : la conception d'un artefact. *Le Travail Humain*, *66*, 101-127.

Cahour, B. (2002). Décalages socio-cognitifs en réunions de conception participative. *Le Travail Humain*, *65*, 315-337.

Cahour, B., & Licoppe, C. (2010). Confrontations aux traces de son activité. Compréhension, développement et régulation de l'agir das un monde de plus en plus réflexif. *Revue d'Anthroplogie des Connaissances*, *4*(2), 243-253.

Caverni, J.-P. (1988). La verbalisation comme source d'observables pour l'étude du fonctionnement cognitif. Dans J.-P. Caverni, C. Bastien, & P. Mendelsohn (Éd.), *Psychologie cognitive: modèles et méthodes* (p. 253-273). Grenoble: Presses Universitaires de Grenoble.

Clot, Y., Faïta, D., Fernandez, G., & Scheller, L. (2000). Entretiens en autoconfrontation croisée : une méthode en clinique de l'activité. *Pistes*, *2*(1).

Clot, Y., & Leplat, J. (2005). La méthode clinique en ergonomie et en psychologie du travail. *Le Travail Humain*, *68*, 289-316.

Cohen, L. M. (1989). A Continuum of Adaptive Creative Behaviors. *Creativity Research Journal*, *2*(3), 169-183.

Conti, R., Coon, H., & Amabile, T. M. (1996). Evidence to Support the Componential Model of Creativity: Secondary Analyses of Three Studies. *Creativity Research Journal*, *9*(4), 385-389.

Cropley, A. J. (1999). Creativity and Cognition: Producing Effective Novelty. *Roeper Review*, *21*, 253-260.

Cropley, A. J. (2006). In Praise of Convergent Thinking. *Creativity Research Journal*, *18*(3), 391-404.

Cross, N. (1997). Descriptive models of creative design: application to an example. *Design Studies*, *18*, 427-455.

Cross, N., Christiaans, H., & Dorst, K. (1996). *Analysing Design Activity*. London: John Wiley & Sons Ltd.

Csikszentmihalyi, M. (1996). *Creativity: Flow and the Psychology of Discovery and Invention*. New York: Harper Perennial.

Darses, F. (1994). *Gestion des contraintes dans la résolution de problèmes de conception* (Thèse de doctorat en psychologie). Paris: Université Paris 8.

Darses, F. (1997). L'ingénierie concourante : un modèle en meilleure adéquation avec les processus cognitifs de conception. Dans P. Bossard, C. Chanchevrier, & P. Leclair (Éd.), *Ingénierie concourante: de la technique au social* (p. 39-55). Paris: Économica.

Darses, F. (2006). Analyse du processus d'argumentation dans une situation de reconception collective d'outillages. *Le Travail Humain*, *69*, 317-347.

Détienne, F. (2002). *MOSAIC. Méthodologie d'analyse pour la modélisation de situations coopératives en conception de produit* (No. CISM 3) (p. 517-522). Rocquencourt: Projet EIFFEL - INRIA.

Détienne, F., Visser, W., & Tabary, R. (2006). Articulation des dimensions graphico-gestuelle et verbale dans l'analyse de la conception collaborative. *Psychologie de l'interaction*, *21-22*, 283-307.

Dorst, K., & Cross, N. (2001). Creativity in the design process: co-evolution of problem–solution. *Design Studies*, *22*, 425-437.

Dourish, P. (2003). The Appropriation of Interactive Technologies: Some Lessons from Placeless Documents. *Computer Supported Cooperative Work*, *12*, 465-490.

Fixmer, P., Chaabouni, S., Gregori, N., & Brassac, C. (2010b). Conception collaborative d'une esquisse à l'aide d'un dispositif numérique de design architectural. *Actes du Quatrième Séminaire de Conception Architecturale Numérique – SCAN'2010*. Marseille, 9-10 décembre.

Gregori, N. (1999). *Étude clinique d'une situation de conception de produit. Vers une pragmatique de la conception* (Thèse de doctorat en psychologie). Nancy: Université Nancy 2.

Guilford, J. P. (1950). Creativity. *American Psychologist*, *5*, 444-454.

Guilford, J. P. (1959). Traits of creativity. Dans H. H. Anderson (Éd.), *Creativity and its cultivation* (p. 142-161). New York: Harper.

Hautecouverture, J.-C., Gregori, N., & Brassac, C. (2007c). Appropriation d'une plate-forme de coopération par des enfants en cadre scolaire. *Revue Européenne de Psychologie Appliquée*, *57*(1), 1-16.

Helson, R. (1996). In Search of the Creative Personality. *Creativity Research Journal*, *9*(4), 295-306.

Hoc, J.-M., & Darses, F. (Éd.). (2004). *Psychologie ergonomique : tendances actuelles*. Paris: Presses Universitaires de France.

Hong, E., & Milgram, R. M. (2010). Creative Thinking Ability: Domain Generality and Specificity. *Creativity Research Journal*, *22*(3), 272-287.

Hutchins, E. (1995). *Cognition in the Wild*. Cambridge: Massachussets Institute of Technology Press.

Jeantet, A. (1998). Les objets intermédiaires dans les processus de conception des produits. *Sociologie du travail*, *98*, 291-316.

Joas, H. (1999). *La créativité de l'agir*. (P. Rusch, Trad.). Paris: Les éditions du Cerf.

Kahl, C. H., Hermes da Fonseca, L., & Witte, E. H. (2009). Revisiting Creativity Research: An Investigation of Contemporary Approaches. *Creativity Research Journal*, *21*(1), 1-5.

Kaptelinin, V., & Nardi, B. (2006). *Acting with Technology. Activity Theory and Interaction Design*. Cambridge: Massachussets Institute of Technology Press.

Latour, B. (1989). *La science en action*. Paris: Éditions La découverte.

Lebahar, J.-C. (1983). *Le dessin d'architecte. Simulation graphique et réduction d'incertitude*. Marseille: Éditions Parenthèses.

Lebahar, J.-C. (2007). *La conception en design industriel et en architecture. Désir, pertinence, coopération et cognition*. Paris: Lavoisier.

Leboutet, L. (1970). La créativité. *L'année psychologique*, *70*(2), 579-625.

Lecourtois, C., Ben Rajeb, S., Guéna, F., Mayeur, A., Darses, F., Leclercq, P., & Safin, S. (2010). Interprétations collaboratives: Usages et implications du Studio Digital Collaboratif en situation de conception architecturale. *Actes du Quatrième Séminaire de Conception Architecturale Numérique – SCAN'2010*. Marseille, 9-10 décembre.

Lubart, R. (2003). *Psychologie de la créativité*. Paris: A. Colin.

Lubart, R. (2005). How can computers be partners in creative process:: Classification and commentary on

the Special Issue. *International Journal of Human-Computer Studies*, *63*, 365-369.

MacKinnon, D. W. (1962). The Nature and Nurture of Creative Talent. *American Psychologist*, *17*, 484-495.

Mathisen, G. E., & Bronnick, K. S. (2009). Creative self-efficacy: An intervention study. *International Journal of Educational Research*, *48*, 21-29.

Midler, C. (1996). *L'auto qui n'existait pas*. Paris: InterÉditions.

Norman, D. (1993). Les artefacts cognitifs. *Raisons pratiques*, *4*, 15-34.

Purcell, A. T., & Gero, J. S. (1998). Drawings and the design process: A review of protocol studies in design and other disciplines and related research in cognitive psychology. *Design Studies*, *19*(4), 389-430.

Rabardel, P. (2005). Instrument subjectif et développement du pouvoir d'agir. Dans P. Rabardel & P. Pastré (Éd.), *Modèles du sujet pour la conception. Dialectiques, activités, développement* (p. 11-29). Toulouse: Octarès.

Rabardel, P., & Pastré, P. (Éd.). (2005). *Modèles du sujet pour la conception. Dialectiques, activités, développement*. Toulouse: Octarès.

Runco, M. A. (1995). Insight for Creativity, Expression for Impact. *Creativity Research Journal*, *8*(4), 377-390.

Runco, M. A., Millar, G., Acar, S., & Cramond, B. (2010). Torrance Tests of Creative Thinking as Predictors of Personal and Public Achievement: A Fifty-Year Follow-Up. *Creativity Research Journal*, *22*(4), 361-368.

Runco, M. A. (1991). *Divergent Thinking*. Ablex Publishing Corporation.

Salembier, P. (2002). Cadres conceptuels et méthodologiques pour l'analyse, la modélisation et l'instrumentation des activités coopératives situées. *Systèmes d'Information et Management*, *2*, 37-56.

Salembier, P., & Pavard, B. (2005). Analyse et modélisation des activités coopératives situées. Évolutions d'un questionnement et apports à la conception. *Activités*, *1*(1), 87-99.

Simonton, D. K. (1999). *Origins of genius: Darwinian perspectives on creativity*. New: Oxford University Press.

Smith, S. M. (1995). Fixation, Incubation, and Insight in Memory and Creative Thinking. Dans S. M. Smith, T. B. Ward, & R. A. Finke (Éd.), *The Creative Cognition Approach* (p. 135-156). Cambridge, MA: The MIT Press.

Soulier, E. (2005). *Le Storytelling: concepts, outils et applications*. Hermes Science Publications.

Sternberg, R. J. (2006). The Nature of Creativity. *Creativity Research Journal*, *18*(1), 87-98.

Sternberg, R. J., & Lubart, R. (1996). Investigating in Creativity. *American Psychologist*, *51*, 677-688.

Suchman, L. (1987). *Plans and situated actions. The problem of human/machine communication*. Cambridge: Cambridge University Press.

Theureau, J. (2010). Les entretiens d'autoconfrontation et de remise en situation par les traces matérielles et le programme de recherche « Cours d'action ». *Revue d'Anthroplogie des Connaissances*, *4*(2), 287-322.

Torrance, E. P. (1976). *Tests de pensée créative*. Paris: Éditions du Centre de Psychologie Appliquée.

Vinck, D. (1999). Les objets intermédiaires dans les réseaux de coopération scientifique. Contribution à la prise en compte des objets dans les dynamiques sociales. *Revue française de sociologie*, *XL*, 385-414.

Visser, W., Darses, F., & Détienne, F. (2004). Approches théoriques pour une ergonomie cognitive de la conception. Dans J.-M. Hoc & F. Darses (Éd.), *Psychologie ergonomique: tendances actuelles* (p. 97-118). Paris: Presses Universitaires de France.

Visser, W., & Détienne, F. (2005). Articulation entre composantes verbale et graphico-gestuelle de l'interaction dans des réunions de conception architecturale. *SCAN'05*.

Wallas, G. (1926). *The Art of Thought*. New York: Harcourt, Brace.

Wehner, L., Csikszentmihalyi, M., & Magyari-Beck, I. (1991). Current approaches used in studying creativity: An exploratory investigation. *Creativity Research Journal*, *4*(3), 261-271.

Weisberg, R. W. (1995). Case Studies of Creative Thinking: Reproduction versus Restructuring. Dans S. M. Smith, T. B. Ward, & R. A. Finke (Éd.), *The Creative Cognition Approach* (p. 53-72). Cambridge, MA: The MIT Press.

Welling, H. (2007). Four Mental Operations in Creative Cognition: The Importance of Abstraction. *Creativity Research Journal*, *19*(2-3), 163-177.

Wertheimer, M. (1945). *Productive thinking*. New York: Harper.

Zeng, L., Proctor, R. W., & Salvendy, G. (2011). Can Traditional Divergent Thinking Tests Be Trusted in Measuring and Predicting Real-World Creativity? *Creativity Research Journal*, *23*(1), 24-37.

4 MÉTHODE, CONCEPTION ET DÉVELOPPEMENT D'UN OUTIL

4.1 LES THÉORIES DE LA FORME

Auteur :
Philippe Marin MAP-ARIA/MAP-CRAI

4.1.1 ARCHÉTYPE ET HYLÉMORPHISME, UN REGARD PHILOSOPHIQUE

Pour envisager la question de la forme, il est dans un premier temps possible de rappeler deux acceptations philosophiques fondamentales, d'une part la notion de forme archétypale proposée par Platon et d'autre part la notion d'hylémorphisme formulée par Atistode.

Le premier, dans sa « théorie des idées », promeut la notion d'archétype, les idées ou formes intelligibles, sont pour lui des modèles idéaux que les choses sensibles imitent. La forme intelligible est le modèle de tout ce qui est supérieur, éternel et unique. A la manière du poinçon à partir duquel on frappe les monnaies, l'archétype est le tout permanent, le modèle à atteindre. Dans le contexte scientifique de l'époque et en s'appuyant sur les travaux de ses contemporains mathématiciens et géomètres, Platon reprend cinq polyèdres réguliers et convexes que sont l'hexaèdre (le cube), l'octaèdre, l'icosaèdre, le tétraèdre et le dodécaèdre, ils deviennent les solides platoniciens, associés aux quatre éléments physiques, la terre, l'air, l'eau et le feu. Le cinquième solide, le dodécaèdre, est associé au tout générateur ou à l'univers. Les propriétés de symétrie, de régularité et de transformation de ces solides feront l'objet de nombreuses études et fascinent encore. Georges Emmerich (Emmerich, 1966) dans son cours de géométrie constructive considère ces géométries élémentaires comme des entités préconçues présentes dans la conscience humaine comme seul moyens d'organisation de l'espace.

Au contraire, Aristote propose la notion d'hylémorphisme. Tout être et toute chose sont construits autour d'une matière et d'une forme, celle-ci nait d'un jeu d'interaction entre structure et matière, la forme n'est plus immuable mais issue des interactions. La matière est source des propriétés quantitatives, la forme est source des propriétés qualitatives.

4.1.2 ESTHÉTIQUE, FORMES ET PERCEPTIONS

Ancré dans les travaux des géomètres antiques, l'architecture classique a défini des principes régulateurs de composition et d'ordonnancement, rythme, proportion, symétrie, répétition deviennent le vocabulaire d'un formalisme canonique. La forme est alors rapidement associée à des principes esthétiques.

L'esthétique dans son acceptation de « science du beau », ou de « critique du goût », édicte pendant un temps les règles de la bonne composition. La forme est d'abord associée à une abstraction géométrique, elle est ensuite construite sur une analogie physionomique, puis se trouve imbriquée avec les sensations et les sentiments (Thibault, 2010). La morphologie devient porteuse de propriétés sensibles. Bientôt l'esthétique se redéfinit comme une science de la perception prenant en compte l'analyse du fonctionnement des organes sensoriels. Les affects esthétiques s'analysent, la physiologie sensorielle et la perception à l'aide du corps et de ces organes perceptifs conduisent progressivement à une mesure des émotions. Le cadre perceptif devient un médium de reconfiguration de la sensibilité, les notions de sympathie, d'harmonie et de suggestion s'esquissent.

Les stimuli atteignant nos organes récepteurs constituent les champs perceptifs interprétés par nos sens que sont la vue, l'audition, le toucher, l'odeur et le goût. Ces modalités sont composées par quatre attributs : la qualité, l'intensité, l'extension et la durée. La vue est un des sens les plus sollicités et la « gestalt », « psychologie de la forme », a largement contribué à une théorisation des processus de perception et de

représentation des phénomènes visuels. Ces derniers sont alors issus d'ensembles structurés non isolés. Ainsi la distinction entre figure et fond est enrichie par nos capacités à regrouper des figures élémentaires selon des principes d'interprétation hiérarchique. Nous en reprenons ici quelques illustrations. Le regroupement de figures élémentaires dans une figure d'ordre supérieur est illustré par la Figure 16 et Figure 17. Le regroupement par proximité et similarité est illustré par la Figure 18, Figure 19 et Figure 20. Les formes closes sont reconnues comme des figures (Figure 21). Nous percevons des figures simples à l'aide d'une reconstruction de la continuité (Figure 22). Les objets symétriques peuvent être considérés comme des unités (Figure 23). Ces exemples illustrent les principes édictés par la Gestalt qui reposent la loi de la bonne forme, la loi de la bonne continuité, la loi de proximité, la loi de similitude, la loi du destin commun, la loi de la clôture. Ces principes ne sont pas sans contradictions et figures et fonds peuvent à tout moment perdre leurs propriétés visuelles en faveurs d'autres qualités.

Le système de relations entre les éléments constitutifs de la forme devient central dans la composition. La valeur esthétique d'une forme peut être associée au degré d'effort mental nécessaire à la perception de l'ordre organisateur. Nombreuses sont les tentatives de mesure des variances et invariances, de l'uniformité et de la variété, de l'ordre et de la complexité pour permettre une quantification de la valeur esthétique. Ces approches s'inscrivent dans le prolongement des travaux en matière de théorie de l'information et de la communication. George Birkhoff (1933) par exemple tente de mesurer la valeur esthétique de composition visuelle et musicale par la formule m=o/c, m représente la valeur esthétique, o est une mesure objective du degré d'ordre et c une mesure objective de la complexité. L'identification des degrés d'uniformité et de variété sont associés à des principes de redondance et d'entropie.

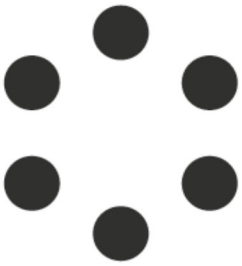


Figure 26. Regroupement de figures élémentaires dans une figure d'ordre supérieur.

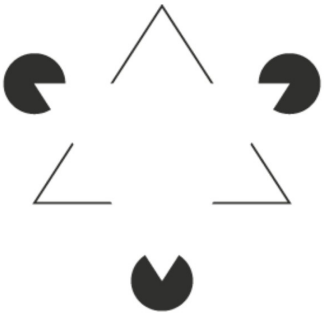


Figure 27. Regroupement de figures élémentaires dans une figure d'ordre supérieur.

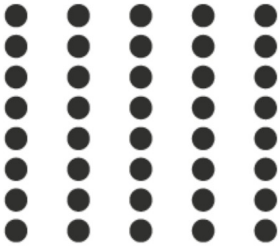


Figure 28. Regroupement par proximité

Figure 29. Regroupement par similarité faisant apparaitre des diagonales

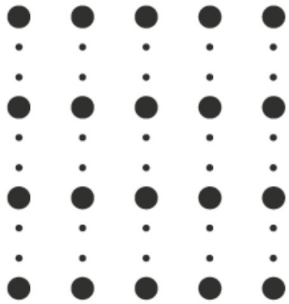


Figure 30. Regroupement par proximité et similarité

Figure 31. Les formes closes sont lues comme des figures

Figure 32. Reconstruction de la continuité

Figure 33. La symétrie du T est perçue plus naturellement que l'asymétrie du L

4.1.3 MORPHOGÉNÈSE ET FORMALISME SCIENTIFIQUE

Les travaux scientifiques qui portent sur la question de la morphogenèse sont nombreux, ils intègrent des formalismes aussi variés que ceux proposés par la thermodynamique, la géométrie, la géométrie fractale, les systèmes dynamiques, l'informatique avec les automates cellulaires ou les L-systèmes. Ils font référence à des espaces temps et des variables d'état à la fois discrets et continus. Ces espaces suivent des régimes d'évolutions déterministes ou stochastiques. Ils questionnent les phénomènes d'émergences, d'auto-assemblage ou d'instabilités .

La compréhension du réel passe par une abstraction et une description simplificatrice des formes qui nous deviennent ainsi intelligibles. Des formes simples et leurs attributs deviennent des ensembles catégoriels facilitant leurs identifications et leurs analyses. Mais la complexité du monde des formes impose des descriptions complémentaires. Les formes doivent ainsi être considérée dans leurs dynamiques en incluant leurs conditions d'émergence ou leurs persistances. Bourgine distingue trois classes de persistance, les formes à *l'équilibre*, les formes *hors équilibre*, les formes *loin de l'équilibre*. La seconde se caractérise par l'état transitoire des formes qui restent en évolution. La troisième classe fait référence au situation dans lesquelles un apport extérieur d'énergie ou de matière est nécessaire pour assurer la persistance du système. La forme en équilibre renvoie à un état de stabilité du système pendant une échelle de temps déterminée, durée pendant laquelle les variables d'état restent stables.

La notion de conditions d'émergence renvoie à la fois à l'état des conditions initiales qui peut orienter l'évolution dans des directions spécifiques ainsi qu'au phénomène d'auto-organisation d'un ensemble d'éléments dont les propriétés émergent de manière spontanée et non prédictible. Une configuration ou structure singulière émerge d'un phénomène collectif construit atour des interactions entre les entités constitutives du système. Ainsi la compréhension d'une forme ou sa morphologie, passe nécessairement par la compréhension de son processus d'apparition, de sa morphogénèse.

4.1.4 STRATÉGIES DE MORPHOGENÈSE ARCHITECTURALE

4.1.4.1 LA FORME ARCHITECTURALE

L'architecture classique a défini des principes régulateurs de composition et d'ordonnancement. Rythme, proportion, symétrie, répétition sont devenus le vocabulaire d'un formalisme canonique trouvant souvent un ancrage dans les travaux des géomètres antiques. Le rythme est associé avec l'idée de régularité et de mouvement. Les règles de ratio et de proportions guident les compositions, largeur, longueur, hauteur des pièces ainsi que l'association des pièces entre elles sont formalisés. Les symétries sont au centre de nombreuses opérations de composition. On parle de symétrie bilatérale, parfois, énantiomorphe, de groupes de symétrie, de symétries par rotation, translation ou réflexion (Mitchell, 1990).

Une autre acceptation du « penser la forme architecturale » est basée sur l'approche constructive. La géométrie constructive, enseignée par Georges Emmerich (Emmerich, 1966), développe ces logiques d'analyse de la structure de la forme en dépassant la géométrie euclidienne, outil privilégié de l'architecture classique, pour s'autoriser une tentative d'axiomatisation de la forme architecturale passant par le formalisme de la topologie. Cette généralisation permet la description de formes complexes, construites à base de polyèdres, ou de réseaux et donnant lieu à des structures spatiales, des surfaces complexes ou des tissages. De la même manière Delarue (Delarue, 1992) propose une série d'exercices destinées aux étudiants en école d'architecture, ils constituent un répertoire de principes qui règlent les phénomènes d'organisation formelle, ils sont un inventaire des modes d'organisation et de structure de la forme, ils présentent les spécificités du

vocabulaire architectural dans sa continuité avec les formes de la vie. Nous présentons ici sous forme de liste les notions et typologies proposées.

Principes de mise en forme et notions associées : Mesure, proportion, symétrie, rythme et harmonie. Hasard et aléatoire, jeux de distributions, phénomènes stochastiques naturels. Combinaisons. Proportions ordonnancées. Modules répétitifs, modules emboitables. Pavage de la surface. Variation et transformations. Agencement d'éléments répétitifs. Polyèdres et distribution de symétrie. Empilement réguliers compacts. Assemblages répétitifs non compacts. Combinatoire spatiale modulaire. Formes et mouvement, trajectoire, enveloppe cinétique, courbes en mouvement. Fluides et turbulences, écoulements.

Typologie de structure : Réseaux cristallographiques. Constructions modulaires. Architectures polyédriques. Systèmes structuraux en ossature. Organisation des formes nodales, nœuds et entrelacs. Forme et forces. Réseau spatial. Compositions en tractions et compressions. Constructions en barres et câbles. Structures auto-tendantes. Statique des formes funiculaires. Formes d'équilibre des résilles tendues. Equilibre des formes caténaires. Composition de chainettes. Voiles funiculaires pendus. Distribution de contraintes. Pliages, pliages rectilignes, pliages curvilignes, plie et fentes, pliages et forces, structures plissées. Cintrage. Gonflable. Voiles. Surface réglée. Mailles. Surface d'égale pente. Surface développable.

Nous notons ici l'importance que prend le mouvement dans la compréhension de la morphologie que proposent Emmerich et Delarue. « Les formes naissent des mouvement de la matière poussée par les forces dont l'origine nous échappe ». Matière et énergie sont ici les composantes de l'espace dont l'unique chose constante est le mouvement. En terme géométrique, le déplacement représente la modalité de description du passage d'une structure géométrique à une structure géométrique de dimension supérieure : générateur et trajectoire décrivent les types de surface (Figure 24).

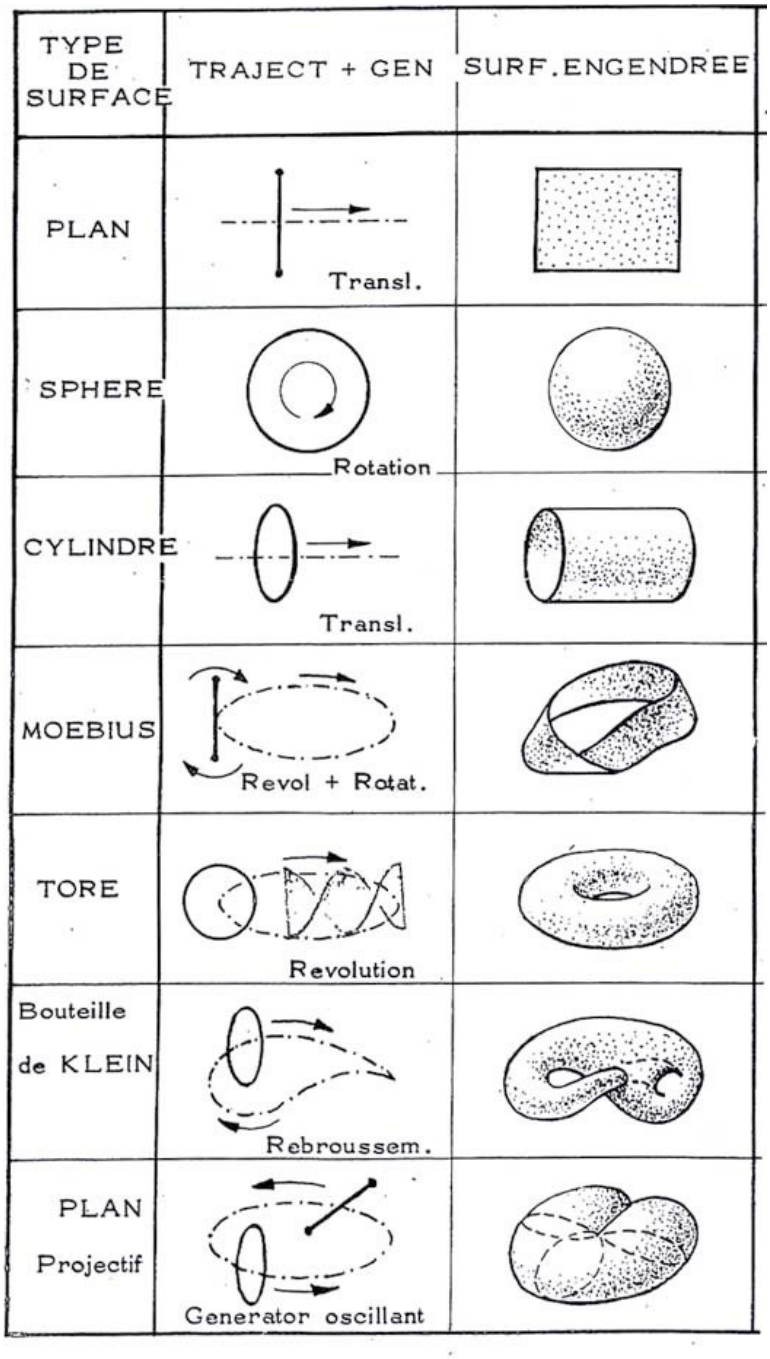


Figure 34. Forme et mouvement, générateur et trajectoire.

4.1.4.2 LE HOMARD ET LA LIMACE

Un autre regard holistique sur la forme architecturale est proposé par Ching (Ching, 2007). Ce dernier quitte les considérations structurelle, esthétique ou symbolique pour identifier deux stratégies de conception de la forme architecturale, chacune procède de logiques distinctes, ces dernières pouvant cependant être utilisées simultanément.

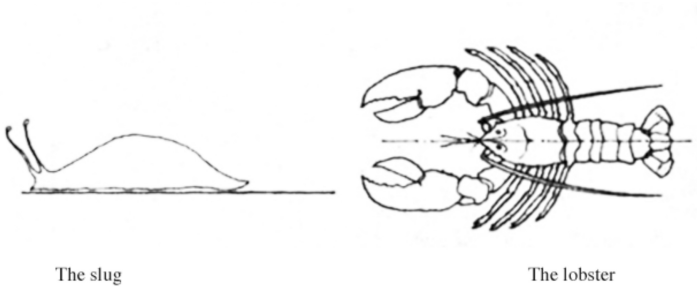


Figure 35. Stratégie de conception architecturale (Ching, 2007)

La première stratégie est qualifiée de « stratégie de la limace ». Nous parlerons de transformation par métamorphose. Ici la déformation est continue, les propriétés topologiques de la forme sont conservées et la forme initiale est transformée par l'application d'opérateurs de déformation de type tordre, étirer, pincer. Les proportions sont altérées, la transformation est non isomorphe.

Nous notons que les travaux du biomathématicien D'Arcy Thompson ont été précurseurs dans la construction de liens entre les phénomènes mécaniques et les formes biologiques. L'auteur a notamment montré des mécanismes de transformation par métamorphose chez différentes espèces animales, conduisant à travers une suite de déformations continues et conservant une même description topologique, à une variété d'espèces. D'Arcy Thompson complète les apports des théories de l'évolution fondées sur les mécanismes de sélection naturelle et insiste sur le rôle des phénomènes physiques et mécaniques dans la constitution de la forme et de la structure des organismes vivants. En architecture, ces travaux ont ouvert la voix aux approches techno-organiques connues en architecture avec les recherches de Frei Otto.

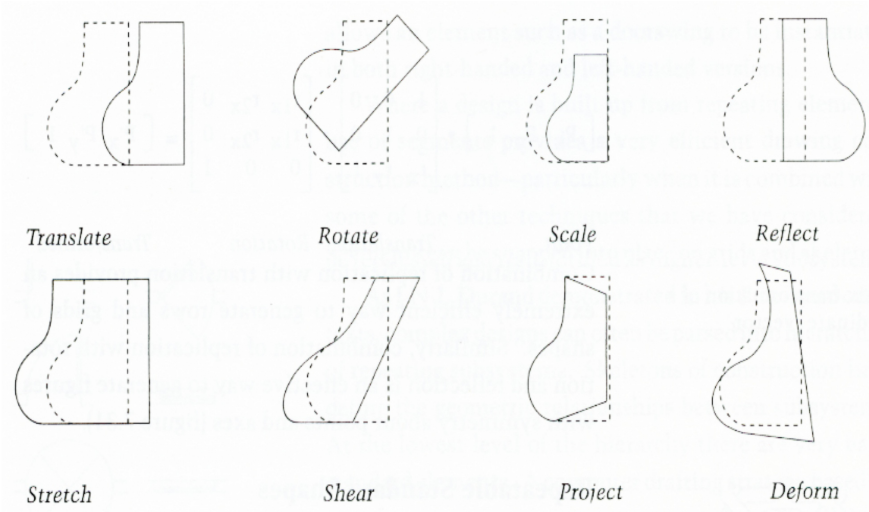


Figure 36. Exemples d'opérateurs de transformation (Mitchell & McCullough, 1991)

La seconde stratégie est métaphoriquement associée à la « stratégie du homard ». Elle consiste à la création d'une forme par l'ajout, la juxtaposition et la combinaison de formes unitaires fondamentales, l'assemblage de primitive de bases. Ces primitives sont associées, juxtaposées et composées pour constituer la forme finale suivant une suite de transformations du type union, intersection, symétrie, rotation. On parlera de transformation par composition.

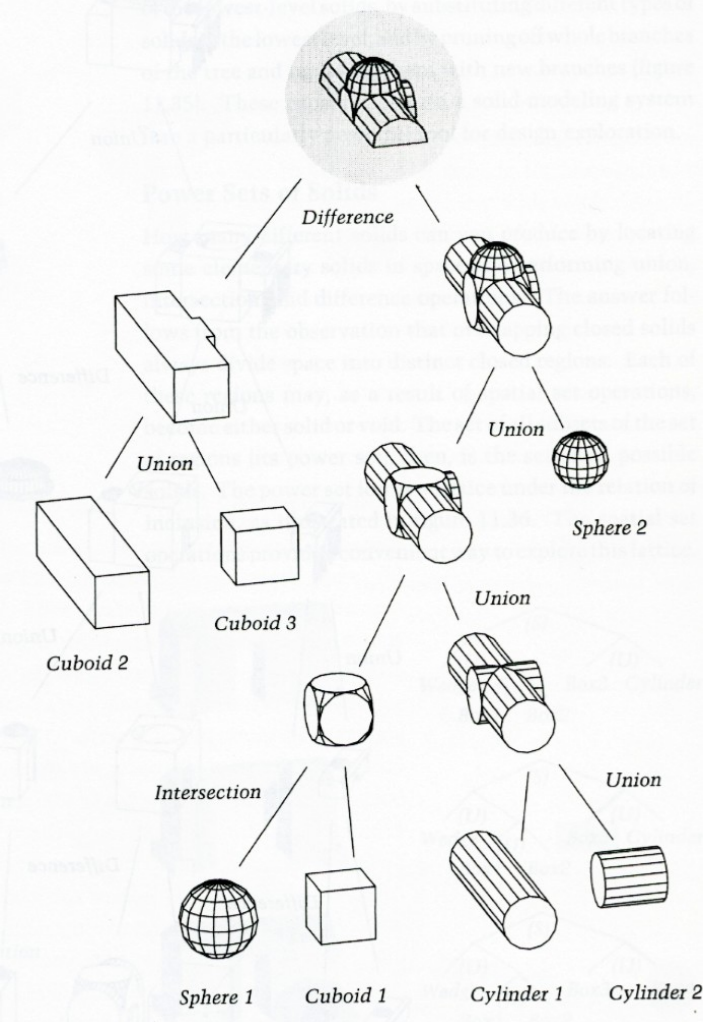


Figure 37. Exemple de transformation par composition. (Mitchell & McCullough, 1991)

L'approche morphologique proposée dans notre programme Ec-Co-Gen-L est basée sur une logique de voxels et elle renvoie à cette stratégie de morphogénèse par accumulation d'unités élémentaires et nous détaillerons plus avant cette approche dans le chapitre 4.

Si précédemment nous avons souhaité porté une regard large sur les questions de morphogénèse, il nous apparaît important de noter que les modalités d'instrumentation du processus de conception architecturale peuvent directement influencer voire déterminer des morphologies particulières. Ainsi nous voudrions maintenant proposer une taxinomie des logiques morphogénétiques associées aux modalités d'instrumentation numérique récentes.

4.1.4.3 MORPHOGÉNÈSE ARCHITECTURALE ET MODALITÉS D'INSTRUMENTATION NUMÉRIQUE

Kolarevic (Kolarevic, 2000) établit une catégorisation des techniques numériques génératives en matière de recherche de forme. Il identifie six « *architectures computationnelles* », basées sur les concepts informatiques associés : « *architecture topologique* », faisant référence à l'espace topologique, « *architecture isomorphique* », utilisant les surfaces isomorphes, « *architecture animée* », convoquant les techniques d'animation dynamique, « *architecture métamorphique* », fondée sur les techniques d'animation par images-clés, « architecture p*aramétrique »* et « *architecture évolutionnaire* » utilisant des techniques de conception paramétrique et algorithmique.

Nous revenons dans les paragraphes suivants sur chacune de ces catégories, mais nous nous permettons de modifier et compléter la taxinomie de Kolarevic. Même si l'ensemble de ces techniques fait référence à des stratégies de conception non compositionnelles, nous associons plus particulièrement les architectures « *isomorphique* », « *topologique* » et « *métamorphique* » à un processus a-compositionnel. L'architecture « *animée* », complétée de la notion de « *datascape* », est caractérisée par l'intégration de données dynamiques. La notion d'architecture performante est ajoutée. Les architectures « p*aramétrique* » et « *évolutionnaire* » sont rassemblées dans une catégorie plus générale appelée processus algorithmique.

4.1.4.3.1 STRATÉGIES NON-COMPOSITIONNELLES

Jacques Lucan (Lucan, 2003), dans son article « On en veut à la composition », analyse le travail d'architectes majeurs de ce début de siècle et qualifie de non compositionnelle leur stratégie de mise en forme. Les architectes comme Koolhass et Herzog et de Meuron considèrent la forme comme « un tout ». Ainsi lorsque Koolhass présente les trois étapes du projet pour la maison Y2K, il explicite un processus de morphogénèse induisant ce qu'il appelle un « volume capable » : la première étape consiste en un assemblage, une agglutination hétérogène des fonctions secondaires de la maison autour d'un vide parallélépipédique accueillant l'espace séjour commun aux membres de la famille. La deuxième étape consiste à la définition d'une épaisseur « servante » englobant l'espace « servi ». La troisième étape est une opération de sculpture du volume, évidement et « facettisation », qui donne forme au « volume capable », monolithe à forme polyédrique irrégulière.

Herzog et De Meuron parlent quant à eux de « forme cherchante » pour qualifier les configurations unitaires et monolithiques de leurs projets (bâtiment Ricola à Laufen, bâtiment de bureaux et de logements à Soleur, pharmacie de l'hôpital cantonal de Bâle, magasin Prada de Tokyo). Ces configurations irrégulières se plient notamment aux caractéristiques du contexte, la forme du bâtiment est informée de l'extérieur et répond aux contraintes particulières du programme et du site. Les architectes procèdent par soustraction de matière par approximations successives ou décisions brutales et appréhendent toujours la forme comme un tout. La description de celle-ci est rendue difficile et nécessite des modalités de représentation nouvelles : développé de façades ou coupes successives en sont quelques exemples. Ces formes unitaires, plutôt qu'harmonieuses, sont qualifiées de rudes ou rudimentaires, elles n'expriment pas les fonctions qu'elles accueillent mais évoquent plutôt des objets trouvés. Aucun système proportionnel compréhensible, aucun principe géométrique intelligible ne guide les dispositions. Ces processus de conception illustrent une volonté de se libérer des principes d'ordonnancement anciens ou modernes et d'habitudes compositionnelles conventionnelles. Les enjeux reposeraient plus sur le choix d'un processus, libérant le concepteur de décisions d'ordre compositionnel, que sur le choix d'une composition. Ici le mode de conception ne repose pas sur des règles connues mais plutôt sur des actions, associées à un processus et ne permettant pas une appréhension a priori du résultat. Adrien Besson (Besson, 2003) à partir d'une analyse notamment des pratiques artistiques du XX° siècle, à travers les mouvements de l'art conceptuel, de l'art concret et de l'art abstrait, qualifie le basculement des théories classiques de la forme et des procédures de composition vers des dispositifs « a-compositionnels », « anti-compositionnels » ou « non-compositionnels ». « *L'avènement de la non-composition met en avant des principes d'agencement qui sont non plus basés sur la relation que ces parties entretiennent entre elles mais sur des procédures qui rassemblent ces éléments.* »

Même si les exemples précédents ne convoquent pas spécifiquement les outils numériques, ils permettent de formuler un regard théorique nouveau sur les principes de morphogénèse. C'est probablement la question du processus qui caractérise le mieux ces différentes modalités. Celui-ci impliquant un non-choix de la forme de la part de l'auteur et renvoyant la définition de la forme à une propriété émergente du processus.

4.1.4.3.2 ARCHITECTURE ISOMORPHIQUE ET TOPOLOGIQUE

Gregg Lynn est précurseur dans l'exploration et le détournement des techniques informatiques mises à sa

disposition. Il utilise les propriétés des surfaces isomorphiques, généralement appelé « *metaballs* », comme méthode d'exploration formelle. L'utilisation des surfaces isomorphiques, objets simulant des interactions à travers des paramètres de forces, masses et attractions, permet l'exploration d'un univers formel dans lequel un champ de force peut être paramétré définissant des zones d'influence et de répulsion et composant ainsi un paysage dynamique et animé.

La description de surfaces continues à l'aide des courbes et surfaces « *NURBS* », « *Non-Uniform Rational B-Spline* », permet une modélisation de familles de formes habituellement décrites à l'aide de la topologie. Cette description basée sur des fonctions paramétriques élargit le champ d'exploration formelle et ouvre la voie à un vocabulaire formel évoquant la fluidité et la continuité. Il reste cependant évident que de tels dispositifs sont plus particulièrement adaptés aux phases de recherche conceptuelle. L'épaisseur de la question architecturale ou la simple résolution constructive des formes induites ne sont pas traitées.

4.1.4.3.3 ARCHITECTURE MÉTAMORPHIQUE

La génération de forme qualifiée de « *métamorphique* » inclut les techniques d'animation par images-clés, par « *morphing* » et par extrusion de profils le long d'une trajectoire. Ces techniques se caractérisent par la définition des conditions géométriques aux limites, l'outil numérique se chargeant de calculer, d'interpoler, les états intermédiaires. Le concepteur peut choisir un état signifiant, parmi les solutions formelles disponibles, et prolonger ainsi son travail (Kolarevic, 2005).

C'est aussi l'utilisation des opérateurs de déformation disponibles dans les modeleurs qui permet l'exploration formelle. L'utilisation d'opérateurs de déformation, comme « tordre » ou « étirer », tout en conservant la description topologique de l'objet, sont particulièrement riches. Même si cette approche peut aujourd'hui être associée à une méthode de modélisation, conduisant la manipulation de formes complexes, son intérêt repose essentiellement sur la recherche conceptuelle, les solutions construites nécessitant une réinterprétation pour permettre leur matérialisation.

4.1.4.4 LES DONNÉES DYNAMIQUES

4.1.4.4.1 ARCHITECTURE ANIMÉE

De nouveau, Greg Lynn est l'un des premiers architectes à utiliser les techniques d'animation à des fins de génération de forme, portant un caractère de figuration plutôt que de représentation. Ce sont à la fois les fonctionnalités de cinématique inverse, d'animation dynamique et d'émission de particules qui sont détournées à des fins de morphogénèse architecturale. Ici la forme s'inscrit dans une évolution contrainte par une série de champs de forces. La forme n'est ni stable ni décomposable en parties, elle est issue d'un système dynamique. Ces champs de forces définis par le concepteur peuvent prendre un caractère abstrait et arbitraire ou être induits par des caractéristiques contextuelles (Kolarevic, 2000). L'opération principale réside dans une déformation progressive d'une ligne ou d'une surface qui réagit à l'action d'une ou plusieurs forces. Cédric Schärer (Marchand, 2006) parle d'une forme indexée pour qualifier ce qui serait l'empreinte ou la mémoire des paramètres dérivés. « *Dans cette optique le projet ne sera pas une représentation, mais une trace du flux d'information. La déformation est en quelque sorte une information de la forme par l'index*. »

4.1.4.4.2 DATASCAPE

MVRDV (Maas, 1999) propose le concept de « *datascape* » pour explorer la complexité des interactions entre les « forces » présentes sur un site. Le champ de forces en présence pouvant représenter à la fois un ensemble de contraintes techniques, de conditions environnementales, comme l'ensoleillement, le vent ou les précipitations, mais aussi des considérations socio-économiques et politiques. MVRDV fait du processus de conception une recherche spatiale ou organisationnelle dans laquelle il implique, dès les prémices du projet,

le plus grand nombre d'intervenants et de données. Chaque fois, les conséquences spatiales, les limites et les possibilités d'un vaste panorama de situations sont examinées et exposées. Certaines de ces influences peuvent être quantifiées et leur évolution modélisée pour permettre une simulation des impacts de chacune des hypothèses. « *Datascape* » induit une quantification et une modélisation statistique des contraintes contextuelles et permet une projection temporelle et des simulations de l'impact des décisions. C'est le potentiel d'information que recèle la représentation de ces champs de forces qui peut guider, orienter ou assister la conception ou la compréhension des phénomènes. La difficulté est d'éviter une transcription littérale des diagrammes des flux et forces en présence dans une forme architecturale, mais plutôt de générer une construction spatiale et temporelle garantissant des qualités architectoniques (Kolarevic, 2005).

L'approche « *datascape* », a contrario des méthodes ou processus précédents, révèle une dimension opératoire quasi opérationnelle. Les outils conçus et développés par l'agence MVRDV en situation de projet sont directement utilisés par l'ensemble des acteurs impliqués, ils conduisent la médiation et participent à l'élaboration des études. Cette approche moins expérimentale que les travaux conduits par Gregg Lynn, se caractérise par sa faisabilité.

4.1.4.4.3 L'ANALYSE DE LA PERFORMANCE

L'APPROCHE TECHNO-ORGANIQUE

Depuis le début du XXe siècle un certain nombre de concepteurs ont inscrit leur processus de conception et de recherche de forme sur des approches qualifiées de techno-organiques. Les modalités d'instrumentation mises en œuvre ici renvoient à une manipulation analogique de dispositifs de simulation structurelle. Les dispositifs, qui prennent la forme de maquettes, visent une mise en forme naturelle et cherchent une optimisation morphologique et structurelle. Les principes sont basés sur l'interaction de trois attributs structurels que sont la forme, les forces associées et la matière utilisée. A travers la mise en œuvre du dispositif de simulation, la forme optimale est naturellement obtenue sous l'effet de la gravité et des tensions structurelles internes en jeu dans le dispositif. Le Ricolais, Gaudi ou Frei Otto sont les représentants les plus célèbres de cette approche. Les maquettes construites à l'aide de chainettes ou de bulles de savon, ainsi que les observations méthodiques de structures organiques illustrent ces travaux bio-inspirés. Les modèles analogiques construits trouvèrent dans un second temps des traductions architecturales directes dans des constructions de couverture de stades, d'église, de coques et voiles béton. Ces méthodes font référence aux premières approches qualifiées de « form-finding » induisant un degré d'optimisation structurelle.

LA SIMULATION

Les performances du bâtiment sont considérées comme moteur du processus de conception. Les technologies numériques sont utilisées pour simuler les performances qualitatives et quantitatives du bâtiment : analyse structurelle, analyse thermique ou acoustique. La simulation des performances du bâtiment est utilisée comme un moteur du processus de conception. La comparaison des hypothèses formelles permet une prise de décision (Kolarevic, 2005). Le projet GLA Headquarters (2002) à Londres, de l'agence d'architecture Foster & Partners, illustre cette optimisation de la performance de l'édifice. Ici les ingénieurs du bureau d'étude Arup ont à la fois optimisé la forme, pour réduire la surface de l'enveloppe du bâtiment et ainsi diminuer les échanges thermiques à travers les parois, mais aussi analysé les performances acoustiques de l'édifice. Les concepteurs ont adapté la forme à des contraintes de performance.

Cette approche par simulation à l'aide de logiciel analytique peut être enrichie en intégrant une dimension générative et en permettant une optimisation logicielle du projet. Nous parlerons alors d'une recherche de forme, ou « form finding », permettant un ajustement automatique et une optimisation. Jean-François Blassel (Marchand, 2006) établit que cette démarche est associée à une métaconception structurelle où la définition des critères de choix et celle des conditions aux limites prennent une importance aussi grande que celle de l'architecture de la structure. D'autres exemples de réalisations instituant des pratiques d'optimisation à

travers des collaborations architectes et ingénieurs, peuvent être consultés dans l'ouvrage « Design Engineering » (Taylor, 2008).

De plus les travaux de Sasaki illustrent particulièrement un processus d'optimisation structurelle d'une passerelle basée sur un algorithme génétique. Les qualités structurelles sont explorées de manière itérative et la géométrie est générée in fine par l'algorithmique génétique. Nous reviendrons au chapitre suivant sur une description précise du fonctionnement des algorithmes évolutionnaires.

Cependant et de manière générale, cette approche fondée sur l'analyse de la performance tombe sous le coup de la critique faite aux outils numériques comme facteurs limitant la créativité du fait du niveau d'expertise qu'ils nécessitent. Il apparaît pourtant que les réflexions ou modélisation conduites à un niveau « meta » pourraient déplacer ces questions et repositionner la question de la créativité à travers l'instrumentation numérique.

4.1.4.4.4 LES PROCESSUS ALGORITHMIQUES

ARCHITECTURE PARAMÉTRIQUE

Le processus de conception paramétrique s'intéresse à la définition d'un ensemble de paramètres qui influence la forme. La forme finale n'est pas au centre de la recherche, elle est induite. La modification de la valeur des paramètres engendre non pas un objet mais un ensemble de variations. Le processus n'est pas simplement fondé sur des valeurs métriques mais plutôt sur l'ensemble des relations entre les objets qui composent la forme. Une modification d'un élément entraîne une transformation du système dans son intégralité. Le modèle paramétrique correspond à une simulation du projet, constituée par un ensemble de relations entre des entités géométriques, dont les paramètres sont manipulables. Le modèle paramétrique permet d'actualiser automatiquement tous les liens et associations. Cette possibilité d'inscrire le modèle géométrique dans une série de variations repose sur le concept numérique d'associativité. Ainsi le projet est constitué d'un ensemble de règles géométriques et de relations logiques entre les éléments premiers du modèle. Ces composants initiaux, points, lignes ou surfaces, constituent par leurs assemblages et leurs mises en relation les hypothèses du projet. La modification de l'un des paramètres entraîne la modification du système dans son ensemble, ainsi le paramétrique permet la manipulation de l'objet à toutes les échelles.

Michael Hensel et Achim Menges (Hensel & Menges, 2006) donne un exemple de composant paramétrique défini à partir d'une manipulation analogique d'une bande de papier. Le composant intègre ainsi les contraintes du matériau, ses possibilités de mise en forme et de déformation et ses modes d'assemblage. Il est un élément unitaire qui une fois démultiplié compose un système plus grand. Le système est lui-même potentiellement transformable par la différenciation de chacun des composants paramétriques. Ici la multiplication des composants est basée sur un principe de « prolifération » sur une surface géométrique. Cette distribution du composant sur son « environnement de prolifération » peut elle-même dépendre d'un ensemble de règles paramétriques ou de principes algorithmiques et rejoindre alors les méthodes génératives.

Ici la question porte sur la géométrisation d'un dispositif dans une perspective opérative de mise en oeuvre. Ce sont les possibilités de modification des valeurs des paramètres qui permettent l'exploration d'un univers de solutions élargi. Les expérimentations conduites dans cette direction pourraient être complétées par des approches intégrant les dimensions, non seulement constructives, mais aussi économiques et sociales.

ARCHITECTURE GÉNÉRATIVE

L'art génératif se réfère à tout art dans lequel l'artiste utilise un système, une grammaire de forme, un programme informatique, une machine ou d'autres mécanismes procéduraux, dans lequel ceux-ci présentent un degré d'autonomie dans l'élaboration de la forme finale. Ces mécanismes génératifs fondent leurs

développements sur les travaux menés en Intelligence Artificielle et Vie Artificielle depuis les années quatre-vingt (Hensel & Menges, 2006). Une méthode générative permet de produire des formes complexes à partir d'un ensemble de règles.

Le développement du « *scripting* » a facilité à la conception algorithmique. Celle-ci permet l'émergence de formes complexes à travers l'instanciation d'un ensemble de fonctions itératives. Ce mode de conception facilite l'interactivité et permet au concepteur d'explorer les questions de l'émergence et de la complexité. La modification des valeurs des paramètres permet l'exploration d'un ensemble de solutions, et facilite la compréhension des interactions. Cette approche se caractérise par sa dimension non linéaire. Les situations atteintes sont initialement imprévisibles. Le projet n'est ici plus formel, mais devient processuel.

Les mécanismes génératifs présentent des intérêts non seulement dans l'élaboration de produits ou artefacts, mais aussi dans l'élaboration des processus de création. La particularité de ces dispositifs repose sur le fait que le designer ne manipule pas l'objet en cours de conception mais le système génératif. Fischer (Fischer & Herr, 2001) identifie trois avantages inhérents à ces mécanismes. Ils permettent l'exploration automatique d'un grand nombre de solutions. Ils sont supposés stimuler la créativité du concepteur. Des mécanismes de sélection devraient permettre d'identifier les bonnes solutions. Cependant une évaluation automatique fondée sur des critères subjectifs, esthétiques ou plastiques, reste difficile.

Il existe plusieurs algorithmes qui peuvent être convoqués à des fins génératives. Parmi les plus répandus nous pouvons citer les L-system et de manière générale l'ensemble des IFS, « *Iterative Function System* », et formalisme fractal. La grammaire de formes, les automates cellulaires, les agents et réseaux de neurones ainsi que les algorithmes évolutionnaires complètent cette famille. La construction d'un atlas des projets associés à ces dispositifs dépasse le cadre de cette étude et nous considérerons plus particulièrement les mécanismes associés aux principes évolutionnaires et convoquant des algorithmes génétiques.

ARCHITECTURE ÉVOLUTIONNAIRE

Le processus de génération de la forme est ici fondé sur les principes de l'évolution des espèces et de sélection naturelle. On entend par algorithme génétique, un processus informatique calqué sur le concept de sélection naturelle de Darwin : population, croisement, reproduction, sélection. Les concepts architecturaux sont exprimés sous forme de règles et leur évolution peut être testée rapidement. Un modèle numérique est transformé à partir de croisements successifs et évalué en fonction d'objectifs et de contraintes prédéfinies. Nous reviendrons plus en détail sur les mécanismes évolutionnaires au chapitre suivant.

Nous pouvons caractériser ces derniers processus de conception par le fait que le rôle du designer bascule vers celui d'un méta designer. Avec l'avènement des technologies numériques dans le champ de la conception, le rôle du designer s'est transformé. Du concepteur créateur d'une oeuvre, d'une solution unique, on assiste aujourd'hui à l'émergence d'un méta designer créateur d'un ensemble élargi de solutions répondant aux contraintes du problème (Soddu, 1998). Le concepteur ne travaille plus à l'élaboration d'un objet exclusif, mais plutôt à la conception d'une famille de formes, dont la solution retenue représentera un état significatif au sein de cet ensemble de potentialités. Comme l'écrit Pierre Levy , le concepteur ne dessine plus un objet mais un système d'objets possibles, une machine à explorer les virtualités. Le domaine de compétence a sauté d'un cran logique en amont, une objectivation des réalités est nécessaire pour permettre une mise en forme logique des opérations intellectuelles.

La mise en oeuvre de ces dispositifs procéduraux implique de la part du concepteur une forme de « lâcher prise ». Ce dernier accepte qu'une part des décisions soit prise par l'outil. L'émergence de nouveautés ou de solutions surprenantes est le résultat du processus. Il n'y a pas de certitude a priori sur le résultat final. Le concepteur établit les conditions de générations des solutions, mais il n'opère plus la concrétisation d'une solution exclusive, il effectue des choix à partir de l'ensemble des possibles qui lui est offert.

Ces pratiques induisent une réflexion sur l'influence de l'outil, sur sa capacité à amplifier des facultés cognitives. Il n'y va pas simplement de l'automatisation des tâches fastidieuses ou répétitives, il n'y va pas

non plus seulement de la réalisation, par les machines, de calculs hors de notre portée. La question porte plus fondamentalement sur les modifications de notre entendement, de notre capacité à connaître, de nos facultés de mémorisation et de conceptualisation.

4.2 EC-CO-GEN-N

4.2.1 UNE APPROCHE PAR LES PATRONS

Auteur :

Jean Claude Bignon MAP-CRAI

4.2.1.1 EFFICIENCE DES PATRONS

La conception architecturale est un processus intellectuel singulier. Qu'elle soit abordée comme une activité cognitive de résolution de problèmes par les recherches héritées des travaux d'Herbert Simon[35] ou comme une activité d'exploration par d'autres auteurs [36] attachés à la conception comme activité de projetation , tout le monde s'accorde aujourd'hui pour reconnaitre la conception comme une activité projective complexe.

N'importe quel problème de conception confronté à de multiples contraintes interdépendantes, se construit et se reconstruit dans un contexte où l'aléatoire est toujours présent. Il y a donc en conception des millions de solutions possibles et même si l'on peut en éliminer un grand nombre facilement par "le bon sens", c'est-à-dire par l'expérience spontanée ou experte de chacun, il reste encore de nombreuses possibilités. Dans un système d'informations incomplètes et incertaines, les concepteurs ayant un comportement à « rationalité limitée [37]», utilisent des stratégies pour choisir rapidement quelles solutions satisfaisantes méritent d'être explorées.

Une autre caractéristique de la conception architecturale est attestée par la propension des concepteurs à "penser solution"[38]. La conception architecturale peut alors être abordée comme une activité de construction de représentations. Cette approche mise en évidence par J-C Lebahar [39], a été confirmée par des études cognitives [40] montrant que la démarche des concepteurs est fondée sur l'évocation de traits concrets de la solution élaborée. Ces derniers sélectionnent un ensemble restreint de contraintes de base, à partir desquelles est choisie une « idée solution », une conjecture sur le produit futur qui servira de base à la construction de la solution.

Pour répondre à cette double caractéristique de la conception architecturale , Christopher Alexander [41]

[35] Herbert Simon, The science of the artificial, (1969), MIT Press, traduction et postface par Jean-Louis Le Moigne, La science des systèmes, science de l'artificiel, (1974), EPI éditeurs, Paris. Réédité en 2004 sous le nom de Les sciences de l'artificiel, Éditions Gallimard

[36] Sabinne Porada , 1993, Imaginer l'espace et spatialiser l'imaginaire, in: Vers une nouvelle pensée visuelle, Réseaux, Na 61, CNET

[37] Claude Parthenay, Herbert Simon : rationalité limitée, théorie des organisations et sciences de l'artificiel, Document de Travail CEPN (Paris XIII et Université de Cergy-Pontoise)

[38] Philippe Marin. 2010.Exploration des mécanismes évolutionnaires appliqués à la conception architecturale. Mise en oeuvre d'un algorithme génétique guidé par les qualités solaires passives de l'enveloppe.Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine. Discipline: Science de l'Architecture.

[39] Jean Charles Lebahar , 1983, Le dessin d'architecte, simulation graphique et réduction d'incertitude,Editions Parenthèse

[40] Françoise Darses, 2005, Contribution De L'Ergonomie Cognitive À La Construction D'Un Modèle D'Expertise Des Activités De Conception De Produits., in Ingénierie Des Connaissances (1cédérom)Editions L'Harmattan.

[41] Christopher Alexander, S. Ishikawa, M. Silverstein, M. Jacobson, I. Fiksdahl-King and S. Angel, (1977), A

aproposé un dispositif heuristique fondé sur l'utilisation de « pattern » encore appelés (de manière équivalente) en Français : patrons , modèles ou motifs.

Les patrons sont des solutions types résultant des pratiques antérieures et validées par l'expérience. Ces solutions émergent le plus souvent d'un long ajustement par essais-erreurs. Elles peuvent avoir été produites anonymement par l'histoire, comme dans les architectures "sans architectes". Elles peuvent également avoir été produites plus consciemment par des maîtres d'oeuvre ou des architectes. Les patrons de conception sont un mode de capitalisation de l'expérience qui permet à la fois d' aider à l'identification et la formulation des problèmes et en même temps de trouver plus rapidement parmi la multitude des solutions possibles des solutions qualitatives éprouvées.

Outre son efficience cognitive et projectuelle , l'approche par les patrons apparait également comme un outil de pratique collaborative[42]. La definition et l'utilisation de 'pattern" permet aux différents acteurs du bâtiment d'échanger de manière explicite sans pour autant rentrer dans les details. Le maître d'ouvrage et l'architecte peuvent tres vite tomber d'acord sur une stratégie de construction en identifiant plusieurs patrons. Les différents membres de la maitrise d'oeuvre (architecture, AMO environnement, BET thermique…) peuvent également avancer en testant et en adaptant conjointement et à partir de leur propes points de vue plusieurs patrons.

Au dela de cet aspect strictement méthodologique, la conception par patrons est une posture théorique sur la creation. Pour Alexander, les formes culturelles en architecture (ou en mathèmatiques) transcendent les productioons individuelles . Les créations individuelles ne sont que des manières d'approcher un modèle culturel ideal en le révélant et en dépassant ses incarnations antérieures. Cette philosophie deja présente dans "L'art de la construction intemporelle[43]" est encore approfondie dans le dernier ouvrage d'Alexander "the nature of order"[44]. Elle mériterait débat car une interprétation idéaliste du propos pourrait laisser entendre à une totale intemporalité des modèles. Or ce qui peut être vrai en science –mais est là encore discutable- ne l'est pas en art et ne l'est pas non plus dans le domaine qui nous concerne, celui de l'architecture à faible impact environnemental. Les patrons que nous évoquons sont toujours situés et les questions environnementales d'aujourd'hui ne sont pas tout à fait celles d'hier. Le rapport que les sociétés entretiennent avec la nature est toujours en construction et dépend des cultures, des techniques et d'une manière générale de l'économie de ces sociétés. Les questions se déplacent. Par exemple les enjeux des matériaux locaux n'acquièrent leurs sens aujourd'hui que mis en parallèle avec les désordres engendrés par une production mondialisée. La question ne se posait pas par définition dans les sociétés autarciques, elle était une donnée inhérente au modèle de production vernaculaire. Une chose est donc de penser que les formes culturelles transcendent les individus une autre est de dire qu'il y a des permanences dans cette transcendance. Nous retiendrons qu'un patron est un dispositif produit collectivement dans un contexte général donné, mais que sa mise en oeuvre précise dépend toujours d'un projet singulier dans un contexte précis.

4.2.1.2 LES ECO-MODELES

Pattern Language : Towns, Buildings, Construction,

[42] Vida Gholipour.2011.Éco-conception collaborative de bâtiments durables.Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine. Discipline: Génie des systèmes industriels.

[43] Christopher Alexander, The Timeless Way of Building, Oxford University press, 1979

[44] Christopher Alexander, The Nature of Order, An Essay on the Art of Building and the Nature of the Univers,.Tome 1 à 4, Center for Environnemental Structure . 2001

D'une manière générale, un pattern répond à un problème récurent dans un contexte donné. Il est d'abord un processus d'identification et de description explicite d'un problème.

Un problème résulte d'un ensemble d'exigences contradictoires issues du contexte. Par exemple le besoin de contrôler la ventilation par des dispositifs mécaniques asservis a conduit au développement de façades sans ouvrant. Mais l'approche environnementale du confort par les usagers suppose une attitude consciente du problème et des moyens de le gérer. Le pattern « fenêtre ouvrable » est une manière de régler cette contradiction. Le pattern en tant que solution est une manière de trouver un équilibre dans un champ de contradictions.

Dans le champ particulier de l'architecture « écologique », les problèmes posés sont relatifs au comportement environnemental des édifices. Ces derniers sont abordés par des objectifs à satisfaire (lumière, énergie, santé…) pour assurer une conception, une fabrication, une utilisation et une fin de vie des bâtiments qui soit soutenable. Il est fréquent que les exigences environnementales rentrent en contradiction avec d'autres exigences qu'elles soient fonctionnelles, techniques ou encore économiques. Par exemple, Le besoin de stationnement des véhicules conduit à la réalisation de parkings aériens bitumés et s'oppose à la gestion des eaux pluviales par infiltration dans le sol et à la nécessité d'éviter les effets d'ilot de chaleur urbain produit par les surfaces sombres. Dans le présent travail nous empruntons le concept de cible utilisée par l'association HQE pour catégoriser les grands objectifs environnementaux à prendre en compte. Un patron satisfait donc une ou plusieurs cibles. On notera que plus le nombre de cibles atteintes est élevé, plus le patron a une dimension totalisante importante et plus il est satisfaisant en conception.

Pour être efficace, le pattern décrit une solution dans des termes suffisamment concrets pour la rendre utilisable dans de nombreuses situations mais aussi suffisamment généraux pour que la solution puisse être adaptée à chaque contexte et jamais reproduite à l'identique. Il s'agit plus d'une solution type que d'une réponse factuelle. Pour être efficiente la solution doit avoir été consacrée par l'usage mais doit également pouvoir être adaptée aux particularités de chaque projet. Ainsi le pattern « Atrium » est simplement décrit comme un percement volumétrique vitrée en couverture. Il peut selon chaque situation de projet être morphologiquement différent, avoir des faces verticales ou inclinées, être en position centrale ou venir tangenter une façade,.

Un pattern est un modèle théorique qui n'existe que lorsqu'il est incarné dans plusieurs réalisations ou opérations concrètes. Une réalisation, ou projet exécuté, est donc à la fois solution à un ou des problèmes concrets et expression d'un ou plusieurs modèles abstraits. Nous associons donc à nos patrons différentes réalisations illustrées par des images.

Un pattern décrit enfin les contraintes qui sont liées à son application. In problème de conception est rarement décomposable en sous problèmes indépendants. En effet toute solution à un problème peut devenir problème pour un ou plusieurs autres objectifs et donc définir un nouveau contexte. Ces contraintes contribuent à la délimitation de l'espace des solutions tout en permettant l'introduction de nouvelles idées, qui peuvent conduire à une reformulation des intentions et induire encore une fois de nouvelles contraintes. L'identification des contraintes participe donc de la méthode de conception en positionnant le concepteur en situation de produire une représentation riche de l'espace des problèmes qui est en général sous spécifié au départ. Elle favorise la conduite de choix satisfaisants, c'est à dire de solutions acceptables.

En résumé un éco-modèle ou éco-patron est donc décrit par un triplet -problème, solution, contraintes- illustré par des exemples de réalisations où il a été mis en forme de manière singulière. Les réalisations doivent avoir été reconnues comme écologiquement signifiantes par des labels, des livres ou des revues dédiés aux approches environnementales en architecture.

4.2.1.3 UN LANGAGE DE MODÈLES

Les patrons forment un vocabulaire mais les patrons ne sont pas des entités isolées. Ils entretiennent des relations entre eux (complémentaires, opposés…) pour former un langage de conception. Un langage de modèles peut s'apparenter à une grammaire de formes mais lui est supérieur en ceci qu'il est consacré par l'usage.

Faire un projet guidé par des modèles consiste à créer des scénarios en combinant des patrons pertinents dans le contexte du projet. Ceux-ci doivent être judicieusement choisis par le concepteur ou ses partenaires (maître d'ouvrage, usagers) pour pouvoir dialoguer entre eux et être en résonnance avec le contexte du projet. Les scénarios doivent être interprétés dans différentes compositions et les patrons s'écrire sous une forme précise dans une solution globale.

L'approche par les patrons ne saurait donc être additive. Des « masques proches » avec un « parking enterré » et une forme arrondie » ne font pas un édifice architecturalement intéressant et durablement performant. Les patrons ne sont pas des parties à assembler mais plutôt des séquences à coordonner ou à intégrer. La question d'un « tout » intégrateur reste toujours posée. Jenny Quillien[45] nous dit que pour Alexander, le tout est le point de départ de toute action tandis que le point d'arrivée est un tout plus intense. Dans cette question du tout, les interactions entre les patrons sont aussi importantes que les patrons eux mêmes.

Si les patrons sont un moyen tactique dans la recherche de solutions, ils ne peuvent pas être utilisés en dehors d'une stratégie globale de projet. L'usage d'un langage d'éco-modèles doit donc s'inscrire dans une démarche totalisante qui, par intégration, par ajustement, mais aussi parfois par rupture, procède à l'émergence d'un tout plus soutenable.

On notera pour finir qu'un patron peut dans certains contexte avoir valeur de stratégie globale pour le projet. Par exemple à l'Académie de formation de Herne Sodingen (architecte : F-H Jourda & G Perraudin) le patron « volume inclus » fait office de concept global pour le projet et devient structurant pour tous les autres patrons.

4.2.1.4 CARACTERISTIQUE DES PATRONS EN ARCHITECTURE

En architecture, le concept de patron ou modèle inclut une dimension spécifique, une caractérisation morphologique et/ou une caractérisation matériaulogique. Il doit pouvoir être dessiné pour devenir une « idée solution ». Par exemple la ventilation naturelle ou naturellement assistée qui est un principe de renouvellement d'air n'est pas un patron mais elle peut être assurée par différents patrons architecturaux comme les « parois ventilées » ou les « cheminées à vent ». Le patron est une représentation abstraite d'une forme-solution concrète. Il est une forme, mais il n'a pas une forme ou plus exactement il peut en avoir plusieurs en fonction de chaque projet particulier. Un éco-modèle a donc des caractéristiques morphologiques intrinsèques variables comme la largeur et la forme des « balcons filants » ou la profondeur des retraits dans les « volumes en gradins « ou les « encorbellements de façade».

Pour définir morphologiquement les éco-modèles nous faisons appel à des opérateurs géométriques de forme comme la « torsion » , la « rotation » ou le « décalage ». D'un point de vue morphologique, un éco-modèle est donc une combinaison d'opérateurs avec des champs de valeurs spécifiques des paramètres. Ces opérateurs peuvent être également utilisés de manière indépendante afin d'apporter des transformations complémentaires aux éco-modèles. Par exemple l'opérateur rotation peut être appliqué au pattern « volume en gradins » qui n'est pas définis intrinsèquement par cet opérateur mais pourra être déformé par ce dernier.

4.2.1.5 CORPUS

[45] Jenny Quillien, 2007, Saisir l'insaissable, des « patterns » aux « séquences » dans l'œuvre de Christopher Alexander, Adaptation française (J Quillien et A Demailly) de « Grasping the ineffable from patterns to sequences, Environnemental Architectural Phenomenology N°1

En nous appuyant sur la littérature relative à l'architecture environnementale (livres, revues, sites Web…) et sur l'analyse de plus de deux cent cinquante réalisations reconnues pour leurs approches « écologiques » nous avons produit prés de quatre vingt dix éco-modèles.

Les bâtiments analysés relèvent de différents usages (habitation collective, individuelle, bâtiments d'enseignements, commerciaux…) et son situés dans des régions différentes du monde. Ils appartiennent autant à l'architecture d'aujourdhui qu'à l'architecture vernaculaire.

Les éco-modèles bien que spatialisés interviennent à des échelles différentes certaines très locales (« fenêtre ouvrantes », « double peau ») et d'autres plus globales (« volume compact » , « encorbellement de façade »). Certains patrons concernent plus le bâtiment en tant qu'ouvrage (« paroi poreuse », « toiture bassin ») et d'autres le bâtiment en tant qu'espace ou volume (« espace frugal », « espaces tampons ») Enfin des patrons s'attachent à l'édifice (« toit blanc », « mur gouttière ») alors que d'autres relèvent plutôt de l'aménagement urbain ou paysagé (« bâti densifié », « trame verte »). Nous avons fait le choix de ne pas les distinguer, de ne pas les encapsuler dans des classes spécifiques ni de les hiérarchiser. Nous pensons d'un tel travail de classement peut conduire à une utilisation simplificatrice des patrons et qu'il est préférable de laisser au concepteur le choix des groupements. L'établissement du système de relations des éco-modèles nous paraît suffisant pour conduire un travail de formulation de problèmes et de recherche de solutions.

Parmi ces éco-modèles nous en avons identifié une vingtaine qui mettent fortement en relation la forme des bâtiments et leur comportement énergétique. Ils sont présentés dans la suite du travail.

4.2.1.6 IMPLÉMENTATION

Pour les besoins de notre travail de recherche nous avons implémenté dans notre outil un nombre limité d'opérateurs (« rotation », « torsion », « décalage », « rétrécissement », « dilatation ») ainsi qu'un nombre limité d'éco-modèles. Ce choix ne prétend à aucune exhaustivité mais il apparaît suffisant pour démontrer la pertinence de notre approche.

Afin de faciliter la génération des eco-modèles, ceux-ci sont répertoriés dans cinq classes d'action :

Forme extérieure :

Volumes en gradin

Encorbellement de façade

Forme arrondie

Hémicycle solaire

Bâtiment hors sol

Enlèvement de volume :

Patio

Atrium

Puits de jour

Ajout de surfaces:

Masques proches

Balcons filants

Galerie extérieure

Caractérisation géométrique :

Volume compact

Volume façonné par le vent

Angles multiples

Terrasse utilisable

Caractérisation physique:

Façade orientée au soleil

Lumière de toit

Nous décrivons par la suite la définition et la paramétrisation de ces entités.

4.2.1.7 PRESENTATION DES ÉCO-MODÈLES

4.2.1.7.1 ATRIUM

ATRIUM	
PROBLEME Les bâtiments profonds ou épais sont souvent de bonnes réponses pour minimiser les dépenses énergétiques mais ils sont difficiles à éclairer par les façades.	
SOLUTION L'atrium est un espace intérieur fortement vitré en couverture pour recevoir de la lumière naturelle. Par différence avec les patios et cours intérieures, il joue un rôle d'espace tampon climatique et peut permettre la réception des eaux pluviales. Généralement central, mais parfois disposé de manière axiale dans les bâtiments allongés, il sert le plus souvent de lieu de rencontre et de circulation. Il abrite fréquemment des coursives et passerelles.	
CONTRAINTES *Acoustiques* Le grand volume de l'atrium et la présence de nombreuses parois réverbérantes (béton, verre…) peuvent induire	

des réflexions gênantes vers l'atrium lui-même ou vers les locaux adjacents. On veillera dans la géométrie de l'atrium, dans le dessin des ouvrages (coursives…) comme dans le choix des matériaux à trouver les solutions adaptées aux usages.

Hygrothermiques

Un grand vitrage en toiture peut entrainer des surchauffes thermiques en période estivale. Des systèmes d'occultation solaire et de ventilation doivent être prévus.

Incendie

En cas d'incendie, l'atrium peut jouer un rôle de cheminée facilitant la propagation des flammes et des fumées. Des solutions de compartimentage des locaux, de déploiement d'un réseau de Sprinklers et de mise en œuvre d'extracteurs de fumée peuvent apporter des solutions.

ACTIONS

Classe d'action : 2

Action :

Enlèvement d'un volume au volume Bâtiment.

Fermeture des surfaces libres extérieures par un vitrage.

4.2.1.7.2 FORME ARRONDIE

FORME ARRONDIE

PROBLEME

Les formes parallélépipédiques qui dominent l'architecture développent des surfaces d'échanges thermiques importantes au regard des volumes utilisés. D'autre part, les façades planes ne permettent pas de suivre avec optimum la course du soleil pour apporter de la lumière et de l'énergie.

SOLUTION

Un plan de forme circulaire apporte un maximum de la lumière reçue par jour en permettant de profiter du soleil durant toute la journée et de faire des économies substantielles sur la lumière artificielle.

Les courbes et les formes arrondies sont aussi des réponses pertinentes dans les ouvrages à basse consommation d'énergie en diminuant les surfaces murales d'échanges et en améliorant l'angle d'incidence du rayonnement solaire pour l'apport de chaleur.

CONTRAINTES

Économiques

Compte tenu des propriétés morphologiques des produits courants du bâtiment (blocs parallélépipédiques, panneaux plans) leurs mises en œuvre dans des ouvrages courbes sont généralement plus onéreuses que dans des parois planes.

Techniques

Les assemblages et jonctions et la finition nécessitent une conception complexes à concevoir et réaliser.

Usage

Les aménagements intérieurs et l'ameublement sont relativement difficiles à effectuer dans des pièces aux murs courbes.

Implantation

Dans les milieux urbains denses, il est difficile de concevoir un bâtiment avec une forme arrondie qui rend la mitoyenneté quasi impossible.

ACTIONS

Classe d'action : 1

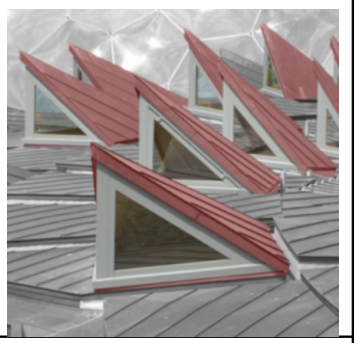
Action :

Création d'une polyligne de forme arrondie.

Gestion de l'orientation – Nord.

4.2.1.7.3 LUMIÈRE DU TOIT

LUMIERE DU TOIT



PROBLEME

Les contraintes fonctionnelles, les contraintes de site, la forte épaisseur ou profondeur des bâtiments induisent parfois la présence de locaux « centraux » ne bénéficiant que d'un faible éclairage naturel.

SOLUTION

Des ruptures et des décalages dans le plan de la toiture ou la mise en œuvre d'éléments de couverture transparents permettent un apport de lumière naturelle par le toit.

L'utilisation d'une telle stratégie a plusieurs avantages : offrir de la lumière aux espaces centraux du bâtiment, apporter une lumière plus constante et indirecte (cas des sheds), éviter l'éblouissement (surtout dans les bureaux où les personnels travaillent sur des écrans), augmenter les espaces intimes à l'intérieur du bâtiment en diminuant les transparences en façade.

Les toitures avec des ouvertures à claire voie, les lanternes de toit, les toiture en sheds sont autant de dispositifs particuliers appartenant à ce patron.

CONTRAINTES

Économiques

Les décalages dans les plans de la toiture multiplient les points singuliers à traiter tant au niveau de la charpente qu'à celui de la couverture avec une forte incidence économique.

Maintenance

Dans certains cas, ce type d'ouverture est difficilement accessible et peut poser des problèmes d'entretien si des dispositifs d'accès spécifiques ne sont pas intégrés.

Usage

Les vues de l'intérieur vers l'extérieur du bâtiment deviennent quasi impossibles ce qui peut gêner les usagers.

Visuelles

Sur les chassis faiblement inclinés, la qualité des apports lumineux peut être réduite dans le temps par l'opacité des vitres liée à la poussière ou la neige.

Hygro-thermiques

Les ouvertures en toiture sont le plus souvent fortement très exposées au vent et à la pluie. Elles doivent avoir un niveau de performance augmentée.

Implantation

Le manque d'ouvertures sur les façades du bâtiment peut causer des formes d'isolement du bâtiment dans son milieu urbain.

Site

Dans les climats où il neige souvent, la qualité des apports lumineux peut être réduite sur les chassis faiblement inclinés.

ACTIONS

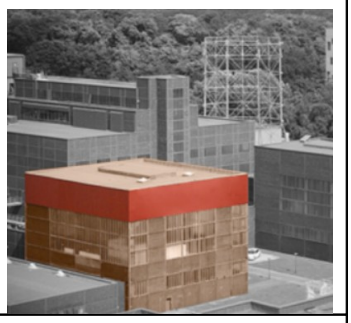
Classe d'action : 5

Action :

Gestion d'un vitrage en toiture.

4.2.1.7.4 VOLUME COMPACT

VOLUME COMPACT



PROBLEME

Pour favoriser les vues extérieures ou tout simplement pour des raisons esthétiques (décrochements, creusements…) de nombreux bâtiments offrent une surface de façade importante qui accroît les échanges thermiques et augmente la quantité d'énergie nécessaire au confort des mètres carrés utiles.

SOLUTION

Privilégier une forte compacité revient, pour un volume habitable fixé, à limiter la surface de déperdition du bâtiment. Pour une même composition de paroi, une variation de la compacité du volume modifie considérablement la demande d'énergie pour le chauffage ou la climatisation. Par ailleurs, la compacité réduit la quantité de matériaux à mettre en œuvre pour construire l'enveloppe de bâtiment et donc son coût.

CONTRAINTES

Distribution

La compacité peut engendrer pour le concepteur des limites dans l'organisation du plan.

Programme

Il est beaucoup plus difficile d'atteindre un bon niveau de compacité pour de petits bâtiments comme les maisons individuelles que pour des immeubles de grande taille comme les bureaux ou les habitations collectives car pour une forme définie, une augmentation de la taille entraîne généralement une augmentation de la compacité.

Esthétiques

Pour avoir un bâtiment compact, il faut privilégier des formes simples, éviter les décrochements ou creusements du volume (type loggia ou bow-windows). Cela peut engendrer pour le concepteur des limites dans l'esthétique du bâtiment.

ACTIONS

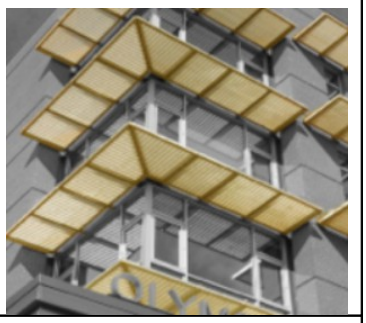
Classe d'action : 4

Action :

Calcul d'un critère géométrique basé sur le rapport surface extérieure-volume.

4.2.1.7.5 MASQUES PROCHES

MASQUES PROCHES



PROBLEME

Dans l'hémisphère Nord, les fenêtres exposées au Sud mais aussi à l'Est et à l'Ouest sont nécessaire pour assurer l'éclairement naturel des locaux, mais elles peuvent produire l'été des surchauffes si leurs dimensions sont trop importantes.

SOLUTION

Les masques proches comme les auvents, les lames verticales ou les brise-soleil intégrés au bâtiment ont différents avantages en fonction de leur disposition. Les masques proches horizontaux fixes sont parfaitement efficaces pour des expositions allant du Sud-Est au Sud-Ouest. En saison chaude, ils coupent le rayonnement du soleil avant qu'il n'atteigne les vitrages. Lors des saisons de chauffage, ils permettent au rayonnement solaire de pénétrer dans le bâtiment et d'être éventuellement stocké par des matériaux de masse, générant ainsi des économies d'énergie. Leur fonctionnement implique impérativement qu'ils soient situés à l'extérieur.

Pour des expositions à l'Est et à l'Ouest (dans l'hémisphère Nord), il faut créer des brise-soleil verticaux mobiles car l'amplitude annuelle de l'angle d'incidence verticale du soleil est faible et dans le cas ou les brise-soleil sont fixes, la quantité d'éclairage en hiver devient insuffisante lorsque la course du soleil est réduite.

CONTRAINTES

Maintenance

Les brise-soleil mobiles automatisés nécessitent une maintenance régulière pour un bon fonctionnement.

Hygro-thermiques

La forme des masques proches et leur écartement (ou non) de la façade peut conduire à des modifications des flux d'air lorsque la ventilation est effectuée par les fenêtres.

Visuelles

Il est nécessaire avant toutes décisions sur le projet d'étudier les masques lointains (naturels et construits) du site.

Il faut prendre garde de ne pas réduire la qualité de l'éclairage par la création de brise-soleil à la forme ou au dimensions inadaptées.

ACTIONS

Classe d'action : 2

Action :

Création de surfaces horizontales accolées ou non aux parois.

4.2.1.7.6 PATIO

PATIO	

PROBLEME

Les bâtiments profonds ou épais sont souvent de bonnes réponses aux exigences climatiques mais ils sont difficiles à éclairer et à ventiler.

SOLUTION

Un patio est un espace extérieur clos par un bâtiment dont il permet d'assurer la luminosité des espaces adjacents. Cette solution, aide à réduire les besoins en climatisation dans les environnements tropicaux, par effet de ventilation naturelle. Dans les climats secs, le patio s'accompagne d'un bassin d'eau qui augmente le confort thermique par évaporation. Dans les climats continentaux, l'implantation d'arbres feuillus permet d'adapter le patio aux saisons chaudes et froides. Enfin cette disposition architecturale qui accueille une terrasse, un bassin ou un jardin ajoute de la qualité de vie au bâtiment.

CONTRAINTES

Usage

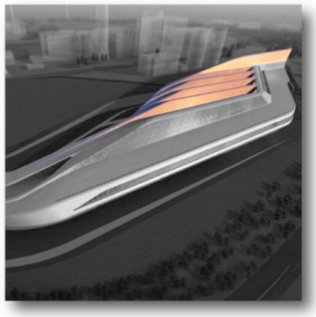
L'extension des bâtiments étant fortement contrainte par ce type d'espace, elle se fait fréquemment par couverture du patio qui perd alors ses fonctions climatiques.

ACTIONS

Classe d'action : 2

Action :

4.2.1.7.7 ENLÈVEMENT D'UN VOLUME AU VOLUME BÂTIMENT.- VOLUME

ENLEVENEMENT D'UN VOLUME AU VOLUME D'UN BATIMENT – VOLUME FACONNE PAR LE VENT	

PROBLEME

Le vent façonne largement la forme de beaucoup d'objets industriels mobiles comme les voitures ou les avions. Bien qu'immobiles, les bâtiments sont aussi, par leurs dimensions, très sollicités par le vent, mais ils ne le prennent en compte que comme une force à laquelle il faut s'opposer.

SOLUTION

La forme d'un toit (ou d'une façade) exposé au vent dominant peut être profilée pour favoriser l'écoulement du vent et offrir une résistance la plus faible possible. Elle peut également canaliser le vent à des fins de confort comme l'amélioration de la ventilation par effet venturi ou le rafraîchissement par un meilleur écoulement de l'air.

À côté de cette approche passive, il existe également des moyens actifs pour récupérer l'énergie apportée par le vent. La mise en place d'éoliennes urbaines au niveau des bâtiments (façades ou toitures) permet de profiter d'un système de production d'énergie renouvelable.

CONTRAINTES

Techniques

La prise en compte du vent conduit à des formes de parois parfois complexes à réaliser et au coût élevé.

Visuelles

Dans certain cas, la direction du vent oblige à fermer une façade qui pourrait offrir de belles vues aux espaces intérieurs.

ACTIONS

Classe d'action : 4

Action :

Calcul du coefficient aérodynamique Cx.

Détermination de la direction des vents dominants.

4.2.1.7.8 PUITS DE JOUR

PUITS DE JOUR	

PROBLEME

Les contraintes fonctionnelles, les contraintes de site, la forte épaisseur ou profondeur des bâtiments induisent parfois la présence de locaux « centraux » ne bénéficiant que d'un faible éclairage naturel.

SOLUTION

Les puits de jour (ou de lumière) sont des dispositifs permettant un bon apport de lumière naturelle pour les espaces centraux. Conduit vertical, le puits de jour prend la lumière par une pénétration en toiture le plus souvent vitrée pour des raisons climatiques et la conduit sur plusieurs niveaux inférieurs par rayonnement direct ou réfléchi sur les parois verticales.

CONTRAINTES

Visuelles

Les puits de jour fortement vitrés sur leurs parois verticales peuvent conduire à des vis-à- vis à l'intérieur des locaux qui sont indésirables.

La quantité de la lumière dépend du rapport entre la section et la profondeur du puits. Lorsque l'on dépasse deux à trois niveaux, le puits doit avoir une section importante ; il est alors parfois plus pertinent d'envisager une autre solution comme l'atrium.

Sur les chassis faiblement inclinés en toiture, la qualité des apports lumineux peut être réduite dans le temps par l'opacité des vitres liée à la poussière ou la neige.

ACTIONS

Classe d'action : 2

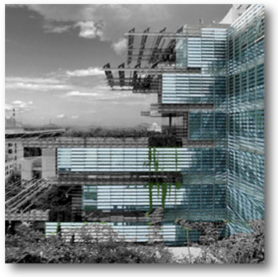
Action :

Enlèvement d'un volume au volume Bâtiment

Fermeture des surfaces libres extérieures par un vitrage.

4.2.1.7.9 ENCORBELLEMENT DE FAÇADE

ENCORBELLEMENT DE FACADE



PROBLEME

Les protections solaires sont le plus souvent des éléments rapportés sur les façades. Dans les cas les plus défavorables, elles ne sont pas intégrées lors de la conception du bâtiment et ne sont rapportées qu'ultérieurement sans être toujours cohérentes avec les baies et parfois au détriment de la qualité même des façades.

SOLUTION

La protection solaire des baies permet de réguler de manière efficace les apports. Une façade peut être plus qu'un simple plan et devenir un véritable volume architectural dont les différences de nus, si ils sont correctement étudiés, jouent un rôle de protection solaire. Ainsi, débords et encorbellements peuvent permettre d'apporter de l'ombre aux étages inférieurs et contribuer passivement à la régulation des apports solaires par les différentes baies (un composant spécifique comme un store pouvant ensuite venir compléter le dispositif).

CONTRAINTES

Techniques

Constructivement, un tel système impose une mise en œuvre complexe, car elle multiplie les points singuliers qui induit couramment des surcoûts.

Hygro-thermiques

Le fait de multiplier les faces conduit à une multiplication des zones thermiques fragiles (ponts thermiques).

Esthétique

La création de débords de dalles, l'inclinaison des parois,… conduit à un traitement complexe de la façade dont la forme doit être pleinement réfléchie.

ACTIONS

Classe d'action : 1

Action :

Décalage horizontal des étages.

4.2.1.7.10 FAÇADE ORIENTÉE AU SOLEIL

FACADE ORENTEE AU SOLEIL	

PROBLEME

Nombre de bâtiments s'édifient en ne tenant pas suffisamment compte des effets du soleil liés à l'orientation. Des schémas d'urbanisme «abstraits»ou une approche trop technique du confort en sont souvent la cause. Les édifices se privent ainsi partiellement de la principale source naturelle de lumière et de chaleur : le soleil.

SOLUTION

Pour utiliser au mieux les potentialités solaires ou au contraire se protéger de ses effets les plus néfastes, il est judicieux d'orienter la plus grande des façades vitrées face au soleil dans les régions froides voire tempérées ou au contraire de la minimiser dans les régions chaudes. Pour s'adapter aux contraintes urbaines, on peut admettre un écart angulaire par rapport au Sud (ou au Nord) de plus ou moins 15°.

CONTRAINTES

Urbanistiques

En zone urbaine, l'orientation est surtout liée aux contraintes parcellaires et viaires, ce qui rend difficile l'optimisation de la position de l'édifice.

Esthétiques

L'orientation de tous les bâtiments d'une même zone dans une même direction ne peut engendrer qu'une forme de monotonie esthétique.

Usages

L'orientation contraint à une distribution spécifique des locaux pas toujours compatible avec d'autres exigences de fonctionnement (accès, organisation...).

ACTIONS

Classe d'action : 5

Action :

Gestion des vitrages des parois.

4.2.1.7.11 GESTION DE L'ORIENTATION – NORD. VOLUMES EN GRADINS

GESTION DE L'ORIENTATION NORD – VOLUMES EN GRADINS

PROBLEME

Pour offrir des espaces extérieurs accessibles sur les immeubles aux façades verticales on a recours aux balcons. Mais plus ceux-ci sont larges, plus ils forment un masque solaire préjudiciable au confort visuel des locaux situés en dessous et plus ils privent ces derniers des apports énergétiques potentiels du soleil.

SOLUTION

Un volume en gradins correctement orienté au soleil permet d'optimiser les apports solaires au niveau des vitrages tout en proposant de grandes terrasses accessibles. Ces dernières peuvent être végétalisées et offrir ainsi des espaces de vie extérieure agréables. Elles peuvent aussi recevoir des vérandas pour former des espaces tampons.

La solution de l'immeuble en gradin est également une réponse pertinente sur les terrains à forte pente, voire pour le respect des prospects de recul en zone urbaine.

CONTRAINTES

Économiques

Compte tenu des propriétés morphologiques du bâtiment, des contraintes de structure et d'enveloppe décalées, des nombreuses étanchéités et dispositifs de garde corps, les immeubles en gradins sont généralement onéreux.

Implantation

Dans les milieux urbains denses, il est parfois difficile de concevoir un bâtiment à gradins qui a tendance à nécessiter plus d'emprise au sol.

Distribution

Par définition le découpage en gradins contraint fortement le concepteur pour la distribution des espaces.

Usage

Un zonage excessif peut pénaliser la flexibilité de l'espace et les changements d'affectation qu'on peut lui demander.

ACTIONS

Classe d'action : 1

Action :

Décalage horizontal des étages.

Troncature du Bâtiment.

4.2.1.7.12 BALCONS FILANTS

BALCONS FILANTS	

PROBLEME

De plus en plus de bâtiments possèdent de grandes baies vitrées pour recevoir de la lumière naturelle et offrir de larges vues aux occupants. Mais ces baies peuvent entraîner des phénomènes de surchauffes climatiques l'été et ne sont pas toujours aisées à nettoyer.

SOLUTION

Les balcons filants forment un brise-soleil continu permettant d'éviter les éblouissements et les surchauffes liés à l'ensoleillement de l'été. Ils jouent par ailleurs un rôle de déflecteur acoustique utile en bordure de zones bruyantes. Ils servent d'espace de maintenance pour faciliter le nettoyage des baies vitrées. Enfin ils peuvent être utilisés comme coursives de circulation et offrent des espaces à vivre semi-ouverts pour les étages s'ils sont assez larges (largeur supérieur à 1,80 m).

CONTRAINTES

Économiques

Les surfaces construites qui n'ont pas de fonctions bien précises sont souvent limitées au niveau de la programmation des bâtiments car elles apparaissent dans les budgets de construction comme un coût suplémentaire.

Hygro-thermiques

Les détails de conception des balcons sont très sensibles aux ponts thermiques. La structure des balcons et les jonctions avec la façade du bâtiment doivent être étudiées pour éviter au maximum les déperditions.

Usage

L'accès d'un logement à un autre devient possible. Des séparations extérieures démontables peuvent être nécessaires. Par ailleurs la fréquence d'utilisation de ces espaces est très dépendante du style de vie d'usagers.

Site

La fréquence d'utilisation de ces espaces est très dépendante du climat dans lequel le bâtiment est situé.

Esthétiques

Les balcons jouent un rôle très important dans l'esthétique d'un bâtiment. Leurs apparences architecturales doivent être le sujet d'une forte conception.

ACTIONS

Classe d'action : 2

Action :

Création de surfaces horizontales par prolongation des planchers.'

4.2.1.7.13 BATIMENT HORS-SOL

BATIMENT HORS-SOL	

PROBLEME

L'implantation d'un bâtiment sur le sol nécessite le plus souvent des modifications de la topographie et des mouvements de terre importants en déblais ou en remblais. Ces transformations peuvent conduire à des changements conséquents pour le site et apportent des difficultés à sa réutilisation ultérieure. Enfin le positionnement sur, ou dans, le sol amène souvent une imperméabilisation des terrains en créant des contraintes pour l'environnement extérieur (infiltration des eaux de pluie limitée, dérivation des eaux souterraines…).

SOLUTION

Les constructions surélevées ou sur pilotis limitent les modifications à apporter au site, et permettent ainsi de le laisser en l'état en fin de vie du bâtiment. Ces constructions peuvent également permettre la circulation de l'air sous les bâtiments et contribuer ainsi à la création d'une ventilation naturelle efficace (essentielles en climat chaud et humide) ainsi qu'à la préservation des matériaux. D'autre part, elles privilégient le développement de la biodiversité et peuvent permettre dans certains contextes de se protéger des animaux.

Cette solution peut se révéler également intéressante pour une construction sur un terrain en pente, dans des zones humides, marécageuses ou inondables, limitant les dégâts en cas de montée des eaux. Enfin, la création d'un espace aménageable au niveau bas peut être propice au développement de certains usages.

CONTRAINTES

Maintenance

Dans les contextes urbains denses, cette solution engendre parfois des espaces mal ou peu entretenus.

Site

Cette solution s'avère essentiellement pertinente dans des climats chauds et humides. En effet, en climat froid elle induit une surface d'enveloppe extérieure plus importante et donc plus déperditive. En outre, elle prive le bâtiment de l'inertie thermique du sol, ce qui est pourtant fort utile dans certaines régions.

Dans certaines zones à risques (inondations,...), cette solution peut s'avérer pertinente.

ACTIONS

Classe d'action : 1

Action :

Elévation du Bâtiment

4.2.1.7.14 GALERIE EXTERIEURE

GALERIE EXTERIEURES	

PROBLEME

Les façades des immeubles distribuées par des circulations extérieures se trouvent souvent exposés aux intempéries, au soleil, à la pollution et aux nuisances sonores.

En zone urbaine, le rez-de-chaussée des bâtiments accueille souvent des commerces et services accessibles par des circulations piétonnes parfois peu agréables à vivre si elles ne reçoivent pas une protection particulière.

SOLUTION

La galerie extérieure protège les circulations attenantes aux bâtiments des diverses nuisances. Elle constitue un masque solaire et protège de la pluie et de la neige et joue ainsi un rôle de tampon climatique. Située aux étages, elle forme un système de circulation collectif protégé. En rez de chaussée, elle trouve sa place prés d'espaces publics majeurs et participe fortement à l'urbanité en offrant des espaces publics agréables à vivre.

En zone climatique très chaude ou très froide, la galerie peut prendre la forme d'une rue couverte afin de "climatiser" partiellement l'espace public.

CONTRAINTES

Conception

Dans un souci de respect des règlements d'urbanisme, essentiellement en zone urbaine ce dispositif n'est pas toujours admis (alignement de façade, recul…)

Programme

Ce dispositif s'oriente plus vers des usages publics, les bâtiments résidentiels urbain n'admettent pas toujours ce type de solution.

ACTIONS

Classe d'action : 2

Action :

Création de surfaces horizontales accolées aux parois

4.2.1.7.15 HEMICYCLE SOLAIRE

HEMICUCLE SOLAIRE	
PROBLEME L'orientation des bâtiments est le premier outil de conception pour répondre aux exigences de soleil, de lumière, de vent et de vues. Les formes des édifices en réponse aux usages, aux gèles d'urbanisme ou à des enjeux purement esthétiques n'offrent pas toujours les solutions morphologiques les plus appropriées pour répondre avec efficacité aux enjeux environnementaux préalablement évoqués.	
SOLUTION La construction d'un bâtiment en forme d'arc permet d'ouvrir au maximum l'édifice au soleil du matin jusqu'au soleil du soir. Correctement positionné sur le site, il permet de se protéger sur sa façade Nord, Nord-Ouest, Nord-Est des vents froids. Largement vitré sur la façade au soleil, il permet la réalisation d'un mur capteur dont l'énergie peut ensuite être stockée dans des matériaux de masse.	
CONTRAINTES *Site* Cette approche n'est possible que sur des sites bien orientés. *Distribution* L'organisation et la distribution des locaux se fait en fonction de leur orientation solaire.	
ACTIONS Classe d'action : 1 Action : Création d'une polyligne particulière. Gestion de l'orientation – Nord.	

4.2.1.7.16 ANGLES MULTIPLES

ANGLES MULTIPLES	
PROBLEME Les bâtiments compacts sont des réponses adaptés à une gestion économe de l'énérgie. Mais dans les region tropicales ou subtropicales, il est necessaire d'assurer une ventilation maximum. Les batiments de type "boite simple" limitent les possibilités de ventilation naturelle. De même dans les régions situées à des lattitudes élévées et confrontées en hiver à des temps d'éclairement naturel réduit , les volumes trop compacts peuvent pénaliser le confort visuel.	
SOLUTION L'utilisation de volumes à angles multiples permet d'augmenter les possibilité d'ouverture de ventilation ou d'éclairage et d'accoitre ainsi le confort .	
CONTRAINTES *Economiques* Les volumes à angles multiples représentent toujours des points singuliers qui augmentent les coûts de construction.	
ACTIONS Classe d'action : 4 Action : Création d'une polyligne particulière. Calcul d'un critère géométrique basé sur le rapport surface extérieure-volume.	

4.2.1.7.17 TERRASSE UTILISABLE

TERRASSE UTILISABLE	
PROBLÈME Nombre de bâtiments contemporains font appel au principe de la toiture terrasse pour couvrir les édifices. Mais ces espaces ne sont le plus souvent accessibles qu'aux personnels effectuant l'entretien et rarement utilisables par les usagers. Cela prive les occupants d'espaces extérieurs agréables permettant de profiter des conditions climatiques favorables lorsqu'elles se présentent naturellement.	

SOLUTION

Dans de nombreuses régions chaudes du monde l'architecture vernaculaire a développé des toitures en terrasses accessibles pour permettre aux habitants de profiter de la fraicheur du soir en faisant de ces toits des lieux de vie de nuit. La terrasse utilisable peut donc être un véritable lieu utile confortable et participer à un zonage climatique des espaces y compris dans les climats plus tempérés. Pour améliorer son confort en journée, la terrasse peut être recouverte de pergolas végétalisées ou de pergolas solaires.La terrasses peut également recevoir de la végétation et particper ainsi à la nécessaire biodiversité.

CONTRAINTE

Accessibilité

Il est nécessaire de prévoir un accès supplémentaire (escalier, rampe) qui a une incidence en terme de distribution des espaces et de coût.

L'accéssibilté aux personnes à mobilité réduite peut en être limitée.

Sécurité

Afin d'assurer la sécurité des personnes et de prévenir les risques de chutes, des dispositifs garde-corps doivent être installés.

ACTIONS

Classe d'action : 4

Action :

Calcul d'un critère basé sur le rapport surface plancher-volume.

4.2.2 PLATEFORME EC-CO-GEN

Auteur :

Gilles Duchanois MAP-CRAI

Mathieu Lamour MAP-CRAI

4.2.2.1 MOTEUR MORPHOGÉNÉTIQUE

L'outil morphologique présenté ici utilise la logique et les fonctionnalités de l'outil Grasshopper sous l'environnement de Rhinoceros.

De façon générale toutes les opérations nécessaires à notre modèle, traduisant une transformation morphologique, doivent pouvoir s'exécuter de façon séquentielle et pour tout ordre souhaité. Il en sera de même pour les éco-modèles ainsi programmés et intégrés dans leur propre cluster.

Pour ce faire nous proposons de mémoriser toutes ces successions de transformations dans une table évolutive représentant les différents planchers, surfaces planes et horizontales, représentant l'état actuel du bâtiment recherché. La description de ces surfaces est limitée à un contour décrit par une polyligne fermée, ce contour pouvant être créé sous Rhino ou paramétré sous Grasshopper.

Le bâtiment définitif est obtenu par élévation verticale de chaque ligne de ces contours d'une hauteur définie

par la distance avec la surface suivante. Cette description un peu restrictive permettra de rester en accord avec les hypothèses de calcul du logiciel EnergyPlus utilisé dans le moteur d 'évaluation (Faces quadrilatères planes, une seule zone thermique).

La table de plancher ainsi définie, représentant un corps de bâtiment, peut être créée et modifiée par les fonctionnalités de base de Grasshopper mais pour plus de facilité cette table sera induite par des clusters préprogrammés indépendants et résultant des opérations suivantes :

- Opérations descriptives : nombre d'étages, hauteur d'étage…
- Opérations logiques : addition, enlèvement de volume…
- Opérations géométriques : rotation, déplacement, homothétie…

Opération descriptive :

Cette opération représente l'étape d'initialisation de la table de planchers, la plus simple étant celle définie par un contour de plancher, un nombre d'étages et une hauteur unique d'étage.

Une table utilisant deux profils de plancher différents peut décrire un immeuble défini par un rez de chaussée à vocation commerciale et des étages de formes différentes à usage de bureau ou d'habitation.

Elle définit l'ensemble de départ d'un d'éco-modèle prédéfini.

Opération logique :

Elle permet une opération logique sur plusieurs tables caractérisant des bâtiments définis en « Brep ».

Nous en avons programmé de deux types :

- l'addition : superposition de deux bâtiments
- la soustraction : Enlèvement de matière permettant ainsi de créer par exemple les patios. Cet enlèvement peut se faire de bas en haut à partir du sol ou de haut en bas à partir du toit.

Opération géométrique :

Cette opération définit une transformation géométrique sur l'ensemble du bâtiment, elle peut être :

- Appliquée sur la table entière :
- Cette transformation permet de déplacer, de tourner ou de tronquer le bâtiment dans son entier. Elle permet par exemple de paramétrer le positionnement du bâtiment sur son terrain et son orientation par rapport au soleil.
- Appliquée à chaque élément de la table (plancher) :

  Ces transformations agissent sur chaque étage et permettent de les déplacer, tourner ou de modifier la taille de manière absolue ou relative suivant une proportion soit constante, linéaire ou quadratique suivant la hauteur.

La programmation séquentielle de ces différentes opérations nous permet de préprogrammer aisément les éco-modèles définis ci-avant appartenant aux classes d'action : Formes extérieures, enlèvement de volume et caractérisation géométrique

Ajout de surface :

La protection solaire est nécessaire au bon confort d'été, on la retrouve implicitement intégrée dans les éco-modèles de classe d'action 3 tels que les masques proches, balcons filants et galerie extérieure.

Ces masques proches sont modélisés de la même manière que les planchers par une table de surfaces. Cette table peut en fonction du modèle être rendue totalement indépendante du reste du bâtiment ou partiellement voire complètement liée à la table des surfaces de plancher permettant ainsi de supporter toutes les

transformations géométriques appliquées au bâtiment.

Les surfaces ainsi obtenues caractériseront les masques proches dans le moteur d'évaluation thermique.

Caractérisation physique :

Afin d'alimenter le moteur d'évaluation en caractéristiques thermiques des parois, un cluster de caractérisation permet d'associer à chaque paroi en fonction de leur orientation par rapport au nord, des propriétés comme :

- la résistance thermique de la paroi opaque.
- Le pourcentage d'ouverture
- Le niveau d'occultation.
- La texture…

Visualisation :

Afin de favoriser une bonne compréhension des différentes actions de l'utilisateur, un cluster de visualisation permet un rendu de l'objet 3D en y incluant les masques, les ombres et les différentes textures.

4.2.2.2 MOTEUR D'ÉVALUATION

Le moteur d'évaluation proposé ici a pour objectif premier de restituer un critère unique d'évaluation à sensibilité environnementale. Il permet à l'utilisateur d'avoir un retour rapide sur les solutions obtenues et de définir une valeur de fitness nécessaire à une approche évolutionnaire. Ce moteur est développé dans l'environnement Rhino-Grasshopper et se compose de plusieurs approches :

- Evaluation géométrique.
- Evaluation fonctionnelle.
- Evaluation thermique.

Les différents critères calculés par ces approches seront tous pondérés et ramenés à une valeur comprise entre 0 et 1. Le poids et la valeur de sensibilité de chaque évaluation peuvent être modifiables par l'utilisateur en fonction de l'orientation souhaitée de l'étude et des priorités imposées au projet.

Une valeur unique de fitness finale est déterminée en multipliant entre eux l'ensemble de ces critères.

Evaluation géométrique :

Volume unique :

L'étude se restreint à un bâtiment unique afin d'en faciliter les approches thermiques.

Un seul Brep fermé dans le modèle 3D.

Compacité :

Un critère de forme défini par le rapport de la surface extérieure sur le volume total du bâtiment est calculé. Une valeur minimale peut être recherchée pour apprécier un confort d'hiver, une valeur maximale serait souhaitable elle pour le confort d'été.

Evaluation fonctionnelle :

Surface imposée :

Le cahier des charges d'un projet impose une valeur de surface utile, le rapport de la surface totale des

planchers sur cette surface utile est déterminé. L'utilisateur peut donc définir la sensibilité de ce type de critère et son poids sur l'ensemble de l'évaluation.

Volume capable :

Un cluster a été développé afin de définir un volume capable lié au projet devant contenir toute solution volumique proposée. Ce volume est défini par les limites du terrain constructible pour sa surface maximale de base et pour hauteur, les maxima imposés par la réglementation locale d'occupation des sols et de voisinage.

Evaluation thermique :

Pour l'évaluation thermique des solutions proposées nous avons choisi d'effectuer une analyse thermique dynamique. L'outil choisi est le logiciel EnergyPlus développé depuis la fin des années 90 par le Lawrence Berckeley National Laboratory, pour le compte du Département Américain de l'Energie (DOE). Le couplage entre EnergyPlus et Grasshopper s'effectue via le module Diva qui nous permet de gérer dans cet environnement les données nécessaires à la simulation à savoir :

- le modèle 3D surfacique dans son orientation par rapport au nord.
- Les propriétés des matériaux constituant les parois.
- La définition et le nombre des baies.
- Les masques proches.
- Les masques lointains.
- Le site et le climat.
- La période de simulation.
- Les scénarii d'occupation, de ventilation, d'équipement, lumière artificielle…

Les quatre premiers points sont définis par le moteur morphologique.

Masque lointain :

Les masques lointains sont définis par l'utilisateur sous Rhino ou Grasshopper par un ensemble de surfaces modélisées caractérisant les limites d'horizon, les volumes des bâtiments ou les obstacles matériels avoisinants pouvant créer un masque solaire sur le modèle étudié.

Le site :

L'utilisateur peut choisir parmi une base de données la région géographique liée à son projet.

La période de simulation :

Les simulations thermiques dynamiques effectuées sur une période d'un an sont fortement consommatrices de temps, il est donc nécessaire de proposer à l'utilisateur plusieurs périodes de simulation :

- Périodes annuelles :

  . Calcul journalier avec un pas de temps tous les 6 mn.

  Cette approche donne la solution la plus précise.

  . Calcul sur 6 semaines types avec un pas de temps de 1 heure.

  Le résultat est ramené à l'année entière.

- Périodes spécifiques :

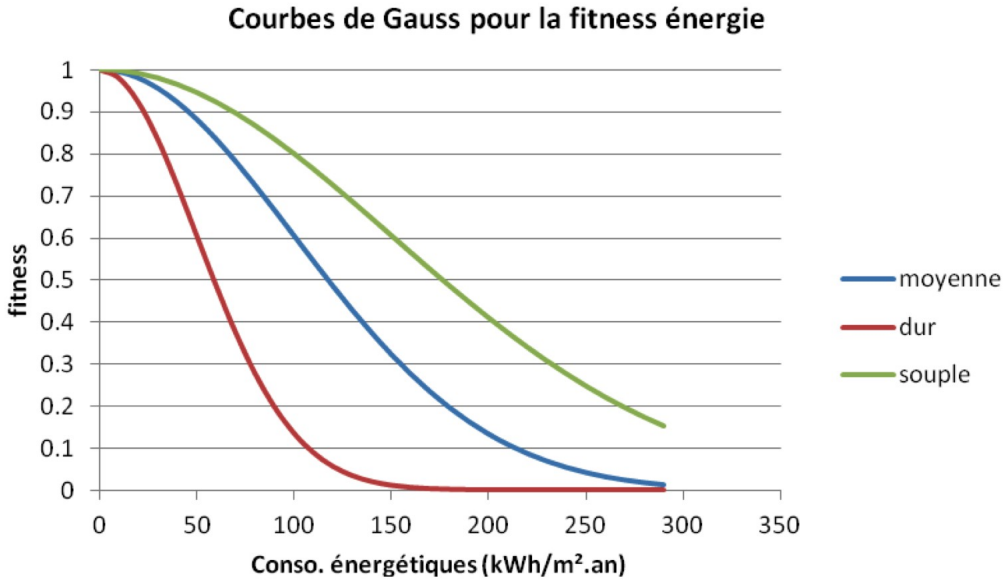
. Jour de dimensionnement de chauffage (confort d'hiver).

. Jour de dimensionnement de refroidissement (confort d'été).

Les scénarii :

Pour chaque usage de bâtiment (habitation, bureau, commerce…) chaque scénario type a été préprogrammé afin de rendre compte d'une simulation du comportement thermique assez réaliste.

Les résultats de ces simulations sont donnés sous forme d'une consommation énergétique exprimée en KWh/m^2/an et ramenée à une fitness normalisée suivant trois types de comportement donné par le critère de sensibilité (Figure suivante).



4.3 EC-CO-GEN-L

4.3.1 MOTEUR MORPHOGÉNÉTIQUE – APPROCHE PAR VOXELS

Auteur :
Philippe Marin, MAP-ARIA

4.3.1.1 INTRODUCTION

Ce document a pour objectif d'expliciter les logiques de morphogénèse à l'œuvre dans le champ architectural. Il conduit plus spécifiquement à la construction d'un état de l'art des pratiques basées sur une approche par voxels et permet un ancrage épistémologique de la logique morphogénétique utilisée dans l'outil Ec-Co-Gen-L.

Le document est structuré en 5 chapitres. Le premier propose un regard élargi sur les théories de la forme. Le deuxième s'intéresse aux stratégies de morphogénèse architecturale. Le troisième est une caractérisation des morphogénèses induites par les modalités d'instrumentation numérique. Le quatrième précise et défini l'approche par voxels. Le dernier chapitre revient sur la solution retenue dans le projet Ec-Co-Gen-L et en marque les caractéristiques.

4.3.1.2 L'APPROCHE PAR VOXELS

4.3.1.2.1 DÉFINITION

Nous appelons Voxel le résultat d'une subdivision uniforme de l'espace, une discrétisation de l'espace. Le terme voxel est une contraction de « Volumetric Element » construit par analogie du pixel « Picture Element ». Le voxel représente une unité élémentaire associée à une position spatiale. Cette unité est de plus porteuse d'un ensemble de propriétés variées, couleur, matière, coordonnées… La décomposition de l'espace en voxels peut prendre plusieurs formes de base mais la grille régulière est plus largement utilisée.

4.3.1.2.2 DOMAINES D'APPLICATION

L'approche par voxels est très utilisée dans le domaine de **l'imagerie**, pour la visualisation et l'analyse des données médicales et scientifiques. Par extension le domaine du jeu vidéo et du rendu 3D des images font largement appel à cette méthode.

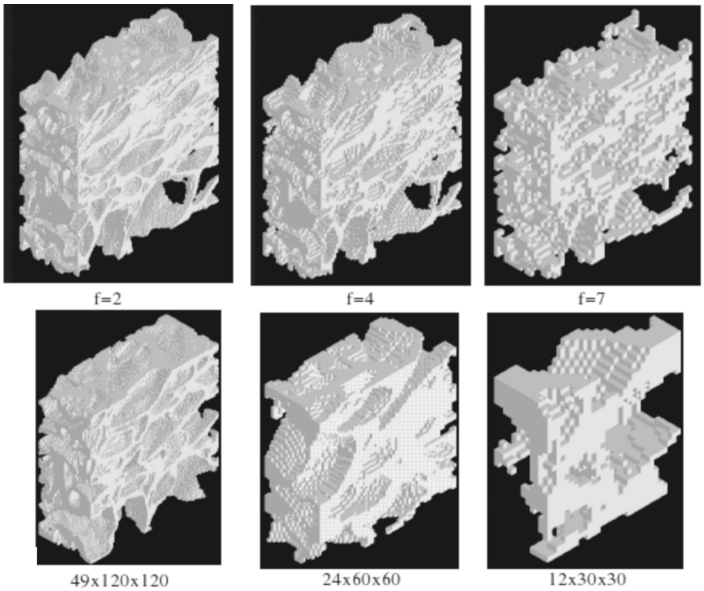


Figure 38. Différentes résolutions d'une tomographie d'une mousse à base d'amidon[46]

Les **méthodes d'analyse par éléments finis** renvoient également à ces techniques de décomposition de l'espace 3D en unités élémentaires de type voxels. La méthode d'analyse par éléments finis permet par exemple de représenter analytiquement le comportement dynamique de certains phénomènes physiques, dans le domaine de la mécanique, de la thermodynamique ou encore de l'acoustique.

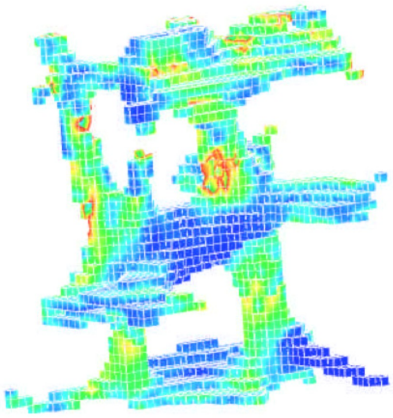


Figure 39. Exemple de représentation d'un matériau sous compression[47]

4.3.1.2.3 EXTENSION DES APPLICATIONS

46

Tiré de Modélisation numérique par une approche micromécanique du comportement de mousses solides alimentaires, M. Chiad1, W-D. Lian2, S. Guessasma1, G. Legrain2, G. Della Valle1, P. Cartraud2 INRA.

47 Modélisation par éléments finis de l'os spongieux de calcanéums humains. Tiré de « Caractérisation Biomécanique et Modélisation 3D par Imagerie X et IRM haute résolution de l'os spongieux humain : Evaluation du risque fracturaire », Hélène Follet.

Les automates cellulaires

Le principe des automates cellulaires renvoie à une décomposition unitaire de l'espace. Historiquement cette décomposition est fondée sur une approche en deux dimensions. C'est Stanislas Ulam (1909-1984) qui dans les années quarante s'intéresse à la dynamique des configurations graphiques engendrée par des règles simples et qui propose un treillis infini composé d'un nombre fini de connexions entre les voisins, chaque nœud pouvant prendre un nombre fini d'états en fonction de l'état de ses voisins. Ulam a constaté que l'utilisation de règles simples permettait d'engendrer une grande diversité de configurations complexes. Il a mis en évidence la complexité et l'imprévisibilité des « objets géométriques récursifs ».

Ces travaux ont directement contribué au développement de la théorie des automates autoréplicateurs de John Von Neumann (1903-1957).

C'est en 1970 que John Horton Conway (1937-) rend célèbre les automates cellulaires avec son « jeu de la vie ». Le jeu de la vie se présente sous la forme d'un espace à deux dimensions, limité et discrétisé. Chaque cellule peut prendre deux valeurs et le jeu est basé sur 3 règles élémentaires décrivant l'état de la cellule en fonction de l'état des cellules voisines. Cette simplicité des conditions initiales permet pourtant de mettre en exergue les principes d'émergence, de réplication, d'interaction ou de complexité.

Les applications des automates cellulaires sont nombreuses et variées. Ils sont notamment utilisés pour la représentation des phénomènes physiques, l'analyse des dynamiques urbaines, le traitement informatique, la cryptographie, la simulation du trafic automobile, les simulations économiques…

La grammaire de forme

Attribué à Stiny (Stiny, 2006) et exploré dès 1976, la grammaire de forme repose sur un processus itératif conduisant la construction de morphologies à partir d'une ou plusieurs formes initiales et d'un ensemble de règles de transformation ou d'assemblage. Les applications associées aux logiques de recherche de formes basées sur une grammaire initiale sont multiples et les domaines d'application sont variés, architecture, design, graphisme, ingénierie ou art. Ces méthodes ont connu un intérêt croissant avec le développement des outils numériques d'assistance de la conception et portent deux objectifs principaux. Elles permettent d'une part l'analyse et la compréhension de styles, en imposant une description explicite de règles permettant en retour d'identifier une composition à un style, ou en permettant des générations automatiques d'instances de ce style. D'autre part ces méthodes induisent des logiques génératives de recherche de forme et participent à une exploration d'un espace de solutions. Elles deviennent alors des outils d'assistance à la conception, support à l'émergence et à la créativité.

4.3.1.2.4 ETAT DE L'ART DES APPROCHES PAR VOXELS

The evolving house

Dans les années 40, Albert Farwell Bemis est responsable d'un programme de recherche au MIT, il coordonne un programme sur les matériaux, les méthodes et l'économie de la construction avec pour objectif de développer l'industrie. Il publie en 1936 le troisième volume du projet « evolving house » (Bemis, 1936). L'étude explore les questions associées à une conception rationalisée de l'architecture, les enjeux de la préfabrication, de la production de masse, de l'industrialisation de la construction, de la standardisation des composants du bâtiment sont explorés. La conception modulaire est au centre de ses travaux et les avantages d'une unité élémentaire sous forme de cube sont présentés. Le module cubique devient le composant principal appliqué à une multitude de matériaux (bois, métal, ciment, plastique), à l'ensemble des composantes du bâtiment (toiture, murs porteurs, sols, doublages, ouvrants, escaliers…) et décliné pour l'ensemble des systèmes constructifs (ossature bois, métal, structure maçonnée…). L'illustration suivante montre la structure d'une maison construite à l'aide de cubes de 4-inch de côté qui s'installent à l'intérieur d'une matrice englobante plus large.

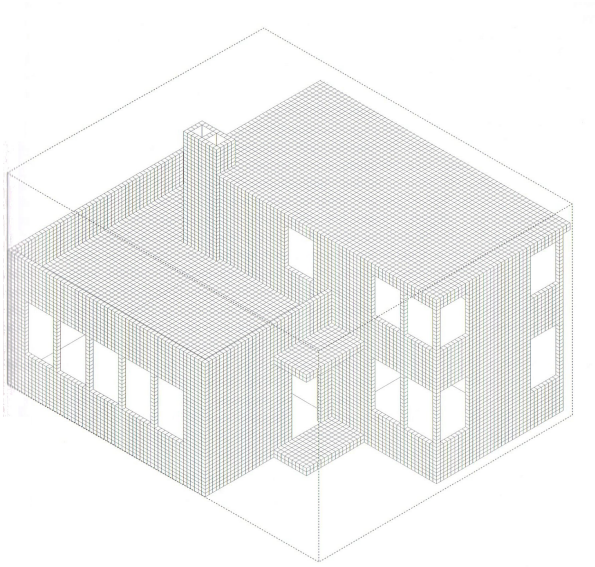


Figure 40. Maison représentée par des cubes de 10 cm (d'après Bemis, 1936)

VOxEL

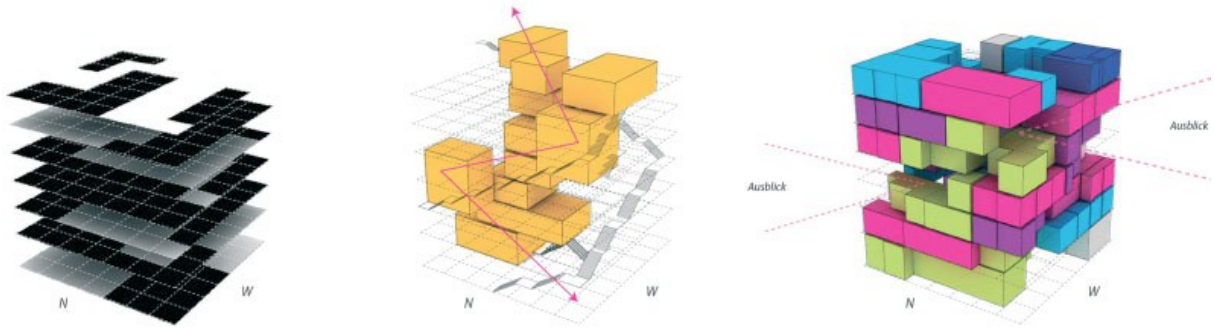


Figure 41. LAVA, VOxEL, Extension pour l'école d'architecture de Stuttgart, 2009. Trois diagrammes décrivant les principes génératifs : 1) Attribution des fonctions 2) Empilement des cellules 3) Distribution du programme.

Le projet VOxEL a été développé dans le cadre d'un concours pour la réalisation d'une école d'architecture à Stuttgart. Le LAVA (laboratory for Visionary Architecture) en collaboration avec Bollinger et Grohmann architectes ont travaillé sur un concept de continuité spatiale et de flexibilité des espaces. Le principe structurel repose sur une grille tridimensionnelle de voxels, dont chaque cellule peut être associée à deux états : un « état vide», offrant un espace ouvert et « état structurel », garantissant les qualités structurelles de l'édifice basées sur une densité de murs porteurs de contreventement. La composition de cette matrice cellulaire a fait l'objet d'une optimisation génétique pour atteindre un optimum structurel. Deux, un unique ou aucun mur sont initialement assignés aléatoirement à chaque « cellule structurelle ». Les critères d'évaluation reposent sur le comportement statique des planchers sous l'effet des forces de gravité verticales, sur le comportement des murs porteurs sous l'effet des efforts latéraux, sur la densité de murs en fonction des propriétés d'état de la cellule. Les configurations avec le plus petit moment de torsion et les meilleures compositions sont sélectionnées et approfondies.

Computational Chair Design project

La Computational Chair est un projet développé par l'agence EZCT (Feriga, 2008). Le CCD projet a été réalisé en collaboration avec Marc Schoenauer, spécialiste des méthodes d'optimisation évolutionnaire. Un espace tridimensionnel est discrétisé en cellules cubiques. Les voxels sont ensuite désactivés pour

progressivement construire une chaise avec un minium de matière.

Figure 42. Maquette de la chaise T1-M, après 860 générations

Voxopolis

Voxopolis est un projet de génération de villes dont l'objectif vise l'étude des mécanismes d'évolution et de croissance des zones urbaines . Basée sur un système multi-agents, l'évolution de la ville est considérée à trois échelles : l'échelle urbaine, l'échelle du bâtiment, et l'échelle de l'habitat individuel. L'espace bâti est discrétisé en voxels dont le comportement est fonction de l'état de ses cellules voisines. Le comportement et l'évolution de l'état des cellules informent les générations suivantes et modifient les caractéristiques de l'échelle supérieure. Ce générateur débute par la subdivision d'un espace urbain en parcelles occupées. Chacune des parcelles est alors associées à trois typologies de bâtiment : des construction de grandes hauteurs, des constructions de hauteurs moyennes et des constructions d'habitat individuel. Les taux d'occupation des bâtiments évoluent en fonction de la croissance de la population urbaine. Les conséquences des décisions d'aménagement ou les objectifs de performances ou de confort peuvent être évalués à long terme en simulant des évolutions d'urbanisation.

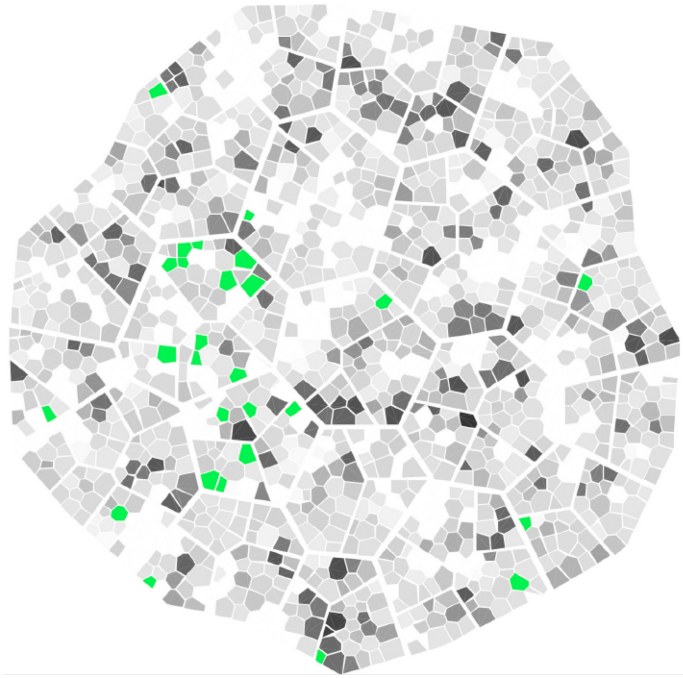


Figure 43. Vue en plan du découpage parcellaire

Building Synthesizer

Building Synthesizer a été développé par Dillenburger en 2009 au sein de l'équipe Kaisersrot de l'ETH de Zürich. L'outil porte sur l'arrangement spatial automatique d'un programme défini sur un site donné. L'outil met en œuvre une stratégie évolutionnaire à travers une population de taille 1. À partir de la description géométrique, topographique et climatique d'un site, l'espace est subdivisé en voxels [48]D. Un ensemble de points est distribué sur le site, leur arrangement n'est pas nécessairement orthogonal, le graphe dual permet de vérifier les liens d'adjacence, puis la surface est discrétisée. Chaque cellule correspond alors à une unité du programme. Les hauteurs de niveau sont constantes et la subdivision en voxels est répétée verticalement à égale distance. Chaque voxel stocke non seulement ses informations géométriques mais également son niveau de performance. La distribution de ces primitives et leur lissage géométrique permet la représentation de l'édifice final. Le moteur d'évaluation est intégré au logiciel dans un souci de performance, d'interaction et d'ergonomie. Chaque cellule est évaluée, chaque qualité est pondérée par un facteur de priorité, et la valeur cumulée des évaluations constitue la note globale. Le modèle d'évaluation est constitué de 10 couples paramètre-qualité associés à des normes : information-perméabilité, température-isolation, lumière-translucidité, vue-transparence, son-isolation acoustique, eau-perméabilité, proximité-coût de circulation, poids-stabilité, profondeur-espace, trafic-accessibilité.

[48] Le voxel correspond à un pixel en trois dimensions, son synonyme boxel est également utilisé, il s'inscrit généralement dans des espaces matriciels.

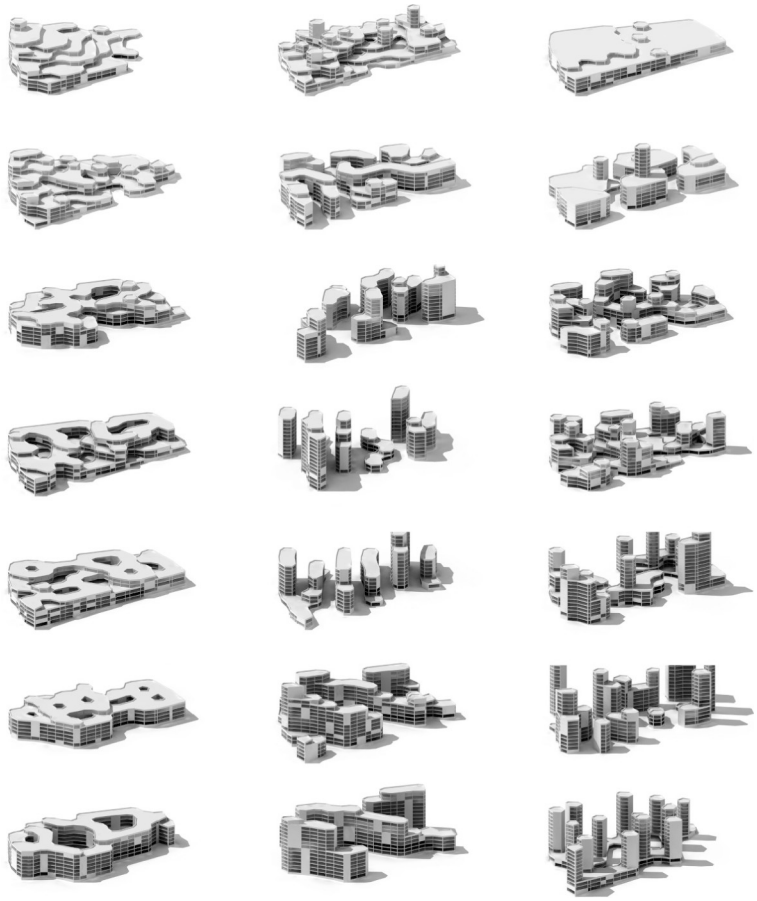


Figure 44. Possibles générations et interprétation matérielles

GS – Generative System

Generative System est développé depuis 2001 par Caldas dans un premier temps au sein des équipes du MIT (Caldas, 2001). Des prolongements du projet initial sont en cours de publication. L'outil porte sur l'optimisation des ouvertures et de la composition des façades en fonction des performances énergétiques de l'enveloppe. Le système combine un algorithme génétique avec un logiciel de simulation énergétique (DOE2.1). Le principe évolutionnaire utilise l'algorithme de Pareto pour construire et représenter un ensemble de solutions non dominées. Le principe morphogénétique repose sur l'identification d'un vocabulaire architectural identifié, le style de Siza. Des volumes élémentaires sont juxtaposés et combinés pour composer des unités d'habitation. La fonction d'évaluation cherche un compromis entre la maximisation de l'éclairement de la pièce et la minimisation des pertes calorifiques à travers les surfaces vitrées.

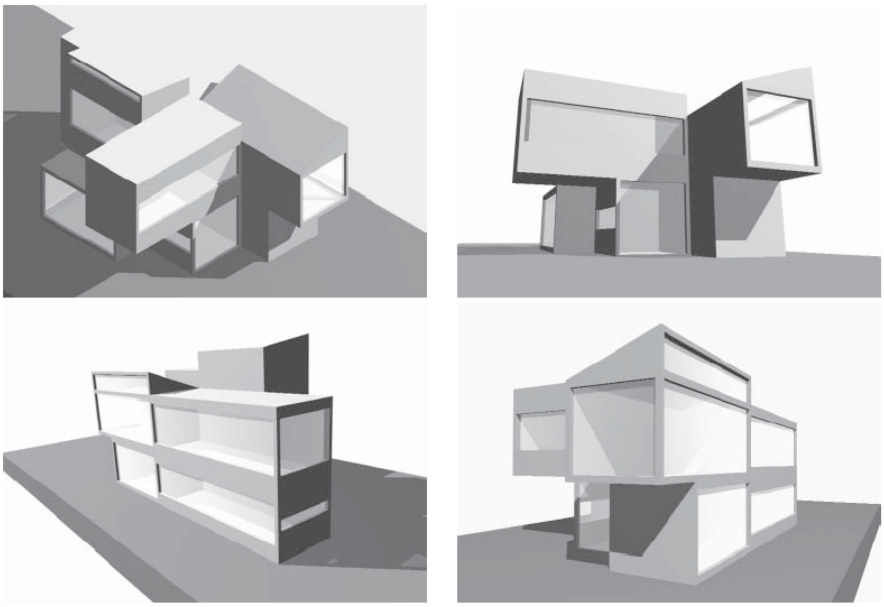


Figure 45. Résultats

4.3.1.3 MOTEUR MORPHOGÉNÉTIQUE :

Le projet Ec-Co-Gen-L reprend la logique morphogénétique des voxels, il est fondé sur un principe d'agglomération d'unités élémentaires, dont la géométrie est pour le moment ramenée à un parallélépipède de taille fixe. La parcelle initiale est découpée en une grille orthogonale dont la trame est paramétrable mais fixe, elles sont fixées à 5x5x4m. Cette grille est ensuite développée dans la troisième dimension et permet la matérialisation des étages et la construction d'un espace matriciel à trois dimensions. Chaque cellule définit alors un voxel qui représente une unité spatiale. La matrice initiale maximise le volume utilisable, dont certaines cellules peuvent être interdites permettant ainsi la prise en compte des contraintes réglementaires ou d'alignement. Cette matrice règlementaire est appelée volume capable, elle délimite et décrit l'ensemble des possibles occupations cellulaires. A partir de ce volume capable, l'évolution et l'instanciation de chaque cellule peuvent commencer.

De plus, chaque voxel est associé à un ensemble de propriétés. Les faces peuvent avoir une matérialité, une opacité, recevoir l'énergie solaire ou contribuer aux échanges thermiques. Les fonctions programmatiques deviennent elles aussi les attributs de la cellule.

Les données d'entrée sont constituées de la description géométrique de la parcelle, de l'environnement urbain et de leur géolocalisation. Un objectif de surface construite est également défini.

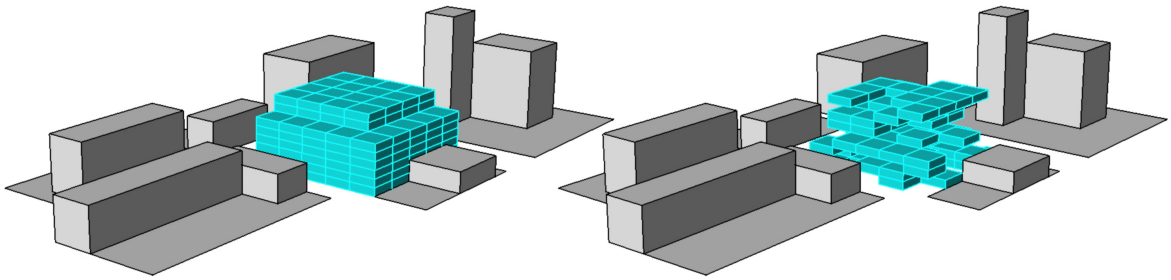


Figure 46. 1) Volume capable. 2) Possible instanciation

Sur un point de vue sémiologique, cette solution morphologique basée sur une unité élémentaire dimensionnée présente l'avantage d'une unité d'interprétation qui s'appuie sur une triple herméneutique : une unité fonctionnelle, une unité constructive, une unité d'ambiance.

Unité fonctionnelle : les usages et fonctions programmatiques sont associés à chaque voxel. Une interprétation directe de la cellule en unité programmatique est possible.

Unité constructive : la grille orthogonale initiale renvoie à un principe constructif basé sur une trame de poteaux poutres. Dans nos premières expérimentations la validité structurelle de la solution n'est pas considérée, mais pourrait rapidement être prise en compte en intégrant une contrainte de superposition des unités.

Unité d'ambiance : chaque voxel peut être considéré isolément, il est espace unitaire dont les conditions d'ambiance peuvent être stables à l'échelle de la perception humaine. La mise en œuvre de modèles d'évaluation thermique simplifiés est alors autorisée.

Ainsi l'approche présente une cohérence d'échelle, le voxel devient l'unité de base soumise aux interprétations et aux multiples lectures que l'architecte peut faire de l'analogon qu'il regarde.

Sur un point de vue informatique, cette solution morphologique assure la consistance des descriptions génotypiques et phénotypiques au cours des croisements et des mutations. Les correspondances entre les descriptions encodées des gênes et leurs transcriptions géométriques restent cohérentes malgré les opérations de transformation et de croisement des gênes.

4.3.1.4 RÉFÉRENCES

Bemis, A. F. (1936). *The evolving house* (Volume III). Cambridge: Technology Press.

Besson, A. (2003). Notes sur quelques stratégies non compositionnelles. *Matières : Ouvrir les horizons : actualité de la critique architecturale*, *6*, 80-89.

Bollinger, K., Grohmann, M., & Tessmann, O. (2010). Structured becoming evolutionary processes in design engeneering. *The New Structuralism: Design, Engineering and Architectural Technologies,* 34.

Bourgine, P., Lesne, A., & Collectif. (2006). *Morphogenèse : L'origine des formes.* Belin.

Caldas, L. G. (2001). *An Evolution-Based Generative Design System : Using Adaptation to Shape Architectural Form.* Bartlett Graduate School, University College London, London.

Ching, F. D. (2007). *Architecture: Form, Space, & Order.* Wiley.

Delarue, J.-M. (1992). *Morphogénèse* (Troisième édition). Ecole d'architecture Parie Villemin.

Dillenburger, B., Braach, M., & Hovestadt, L. (2009). *Building design as individual compromise between qualities and costs : A general approach for automated building permanent cost and quality control*. Proceedings from CAAD Futures, Montréal, Canada.

Emmerich, D. G. (1966). *Cours de géométrie constructive morphologie.* Paris:.

Feriga, J. (2008). *Notes on the Potential of Simulation for Architectural Conception*. Proceedings from ACADIA, Minneapolis, USA.

Fischer, T., & Herr, C. (2001). *Teaching Generative Design*. Proceedings from GenerativeArt, Milan.

Hensel, M., & Menges, A. (2006). *Morpho-ecologies: Towards Heterogeneous Space in Architectural Design.* Architectural Association Publications.

Hovestadt, L., & Danaher, T. (2009). *Jenseits Des Rasters -- Architektur Und Informationstechnologie/Beyond the Grid -- Architecture and Information Technology: Anwendungen einer digitalen Architektonik / Applications of a Digital Architectonic.* Birkhauser Verlag AG.

Kolarevic, b. (2000). *Digital morhogenesis and computational architectures*. Proceedings from Sigradi 2000, Rio de Janeiro.

Kolarevic, B. (2005). *Architecture in the Digital Age : Design and Manufacturing.* Taylor & Francis.

Kuo, J., & Zausinger, D. (2010). *Scale and Complexity: Multi-layered, multi-scalar agent networks in time-based urban design*. Proceedings from ECAADE, Zurich (Switzerland).

Lévy, P. (1992). *La machine univers. Création et culture informatique.* Seuil.

Lucan, J. (2003). On en veut à la composition (2). *Matières : Ouvrir les horizons : actualité de la critique architecturale*, *6*, 68-79.

Maas, W. (1999). *MVRDV - Metacity Datatown.* 010 Uitgeverij.

Marchand, B. (2006). La nature oragnique des formes de la croissance. Le cas particulier des structures en nappes horizontales. *Matières : Croissance*, *8*, 21-34.

Mitchell, W. J. (1990). *The Logic of Architecture: Design, Computation, and Cognition.* MIT Press (MA).

Mitchell, W. J., & McCullough, M. (1991). *Digital Design Media: A Handbook for Architects and Design Professionals.* John Wiley & Sons Inc.

Sasaki, M., Ito, T., & Isozaki, A. (2007). *Morphogenesis of Flux Structure.* Architectural Association Publications.

Soddu, C. (1998). *Argenia, a Natural Generative Design*. Proceedings from Generative Art, Milan.

Stiny, G. (2006). *Shape: Talking about Seeing and Doing.* The MIT Press.

Taylor, A. K. (2008). *Design Engineering.* Actar.

Thibault, E. (2010). *La géométrie des émotions : Les esthétiques scientifiques de l'architecture en France, 1860-1950.* Editions Mardaga.

Thompson, D. A. W., Bonner, J. T., & Prochiantz, A. (2009). *Forme et croissance.* Seuil.

4.3.2 MOTEUR D'ÉVALUATION – MÉTHODE DES DEGRÉS JOURS UNIFIÉS

Auteur : Philippe Marin, MAP-ARIA

4.3.2.1 MÉTHODE D'ÉVALUATION RETENUE : MÉTHODE DES DEGRÉS JOURS UNIFIÉS

Le modèle énergétique que nous retiendrons est fondé sur la Méthode des Degrés Jours Unifiés (DJU). Cette méthode a été retenue du fait des simplifications qu'elle propose. En effet, au stade initial de la conception tous les paramètres ne sont pas identifiés et il est nécessaire de faire des approximations simplificatrices. De

plus nous nous intéresserons plus particulièrement à la notion de confort d'hiver.

Cette méthode de DJU (Cardonnel 2004) date d'une cinquantaine d'années et consiste à déterminer la somme des écarts positifs de température entre ambiance à 18°C et le climat extérieur sur une période donnée. De nombreuses bases de données climatiques fournissent des relevés de température pour les différentes villes françaises.

La formule générale de calcul est la suivante : $D = Ht \times Dh(\theta a)$

avec :

D : déperditions de chauffage du bâtiment en kWh/an ou sur la période considérée.

Ht : coefficient de déperdition du bâtiment (Henv enveloppe + Hrev ventilation) en W/K. Le détail des calculs des coefficients de déperdition, en fonction des résistances thermiques, est fourni au chapitre suivant.

Dh(a) : valeur des degrés heures de base sur la période considérée en K°Ch. Dh est une forme de DJU, intégré au pas horaire et non journalier, qui permet d'éviter la multiplication par 24.

a : est la température de consigne °C, éventuellement corrigée en tenant compte de la programmation et de l'inertie thermique du bâtiment.

Les déperditions (D) sont compensées en partie par les apports gratuits internes (AI) et solaires (AS) qui participent directement au chauffage. Cette récupération de chaleur dépend essentiellement du rapport apports gratuits sur déperditions et de l'inertie du bâtiment.

Les apports internes et solaires sont définis en kWh : $AG = AI + AS$
Le détail des calculs des apports solaires, en fonction de l'orientation et de l'inclinaison, est fourni au chapitre suivant.

Le rapport des gains sur la déperdition de la période de chauffage sont : $\gamma = AG/D$

Le rendement de la récupération des apports gratuits. Il est déterminé graphiquement en suivant la méthode proposée par la Méthode 5000 : $\eta = f(\gamma, inertie\ bâtiment)$

Le détail du calcul est donné ici :

$$\eta = 1 - (0,581 - \frac{0,0957}{\gamma}) e^{-(0,0279 - 0,0195\gamma)\tau}$$

: correspond au rapport entre apports et déperdition, vu précédemment.

: correspond à la constante de temps ou période de déphasage. Elle peut être établie de manière approximative en fonction de la classe d'inertie du bâtiment :

Classe d'inertie	Type de Building	I : Masse thermique (kg/m2)	: Constante de temps (h)
5	Appartement	400 kg/m2	200 h
5	Maison – Classe d'inertie	> 1400 kg/m2	100 h

	haute		
3	Maison – Classe d'inertie moyenne	< 400 kg/m2	50 h
2	Maison – Classe d'inertie basse	< 150 kg/m2	25 h
1	Maison – Classe d'inertie très basse	< 60 kg/m2	10 h

Correspondance entre classe d'inertie, type de bâtiment, masse thermique et période de déphasage.

Nous donnons ici son mode de calcul :

$$\tau = \frac{E \times 24}{Dj}$$

avec

Dj : correspondant à la déperdition quotidienne

E : correspondant à l'énergie totale stockée dans le bâtiment.

$$E = \sum_{i=1}^{Ni} E_i A_i + \sum_{e=1}^{Ne} E_e A_e$$

où :

N_i E_i et A_i représentent le nombre, l'énergie et la surface des murs intérieurs.

N_e E_e et A_e représentent le nombre, l'énergie et la surface des murs extérieurs.

Les courbes d'efficience sont utilisées pour résoudre graphiquement la valeur du facteur d'utilisation. En fonction de la valeur de et de la classe d'inertie du bâtiment on peut lire la valeur du facteur d'utilisation ou rendement .

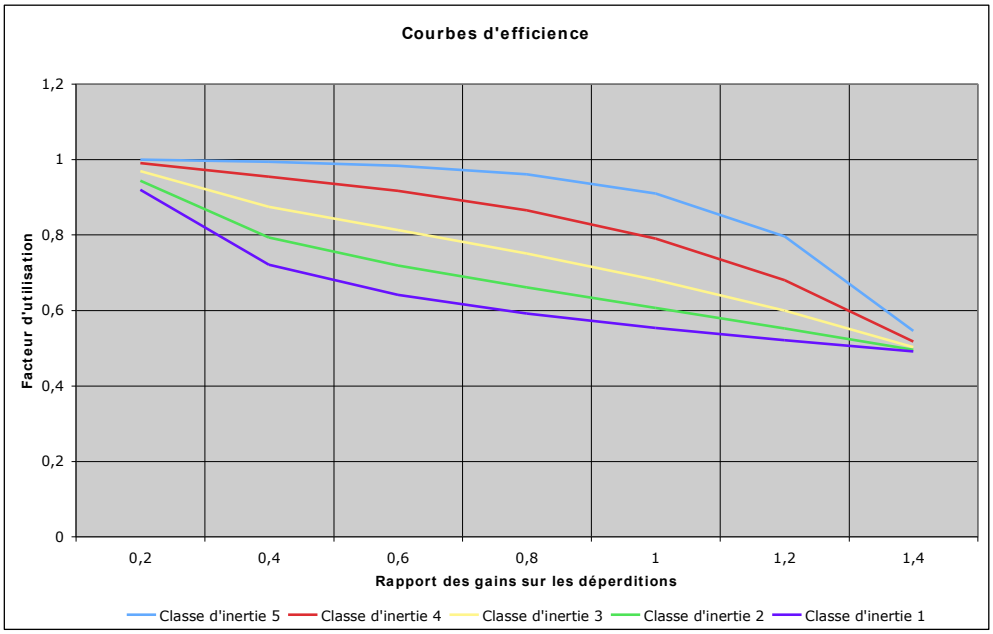


Figure 47. Courbes d'efficience.

Finalement le besoin en chauffage qui intègre la récupération des apports gratuits est en kWh : $B = D - \eta AG$

La figure 1 donne une description du modèle énergétique développé. Les paramètres environnementaux sont stockés dans des tableaux : l'irradiation moyenne en fonction de l'orientation et de l'angle d'incidence, la température moyenne, les coefficients de résistance thermique, le facteur solaire du vitrage et la classe d'inertie. Nous retenons les valeurs officielles associées à une zone climatique H1. Dans notre expérimentation, les valeurs des coefficients de résistance thermique et de facteur solaire sont fixés a priori. Ces valeurs sont les suivantes : facteur solaire (en %) Sg = 75, correspondant à un double vitrage 4/12/4. Coefficient de transmission surfacique thermique du vitrage (en W/m^2.K) U = 2,9. Coefficient de transmission surfacique thermique d'une paroi opaque (en W/m^2.K) U = 0,4. Un mécanisme exploratoire pour l'ajustement de ces valeurs pourrait être envisageable dans un deuxième temps.

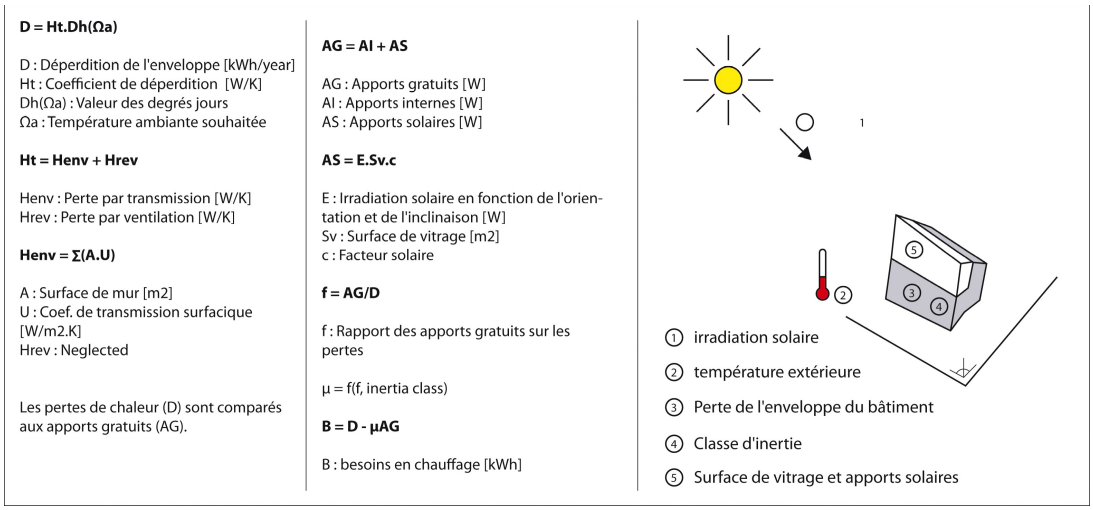

D = Ht.Dh(Ωa)
D : Déperdition de l'enveloppe [kWh/year]
Ht : Coefficient de déperdition [W/K]
Dh(Ωa) : Valeur des degrés jours
Ωa : Température ambiante souhaitée
Ht = Henv + Hrev
Henv : Perte par transmission [W/K]
Hrev : Perte par ventilation [W/K]
Henv = Σ(A.U)
A : Surface de mur [m2]
U : Coef. de transmission surfacique [W/m2.K]
Hrev : Neglected
Les pertes de chaleur (D) sont comparés aux apports gratuits (AG).
AG = AI + AS
AG : Apports gratuits [W]
AI : Apports internes [W]
AS : Apports solaires [W]
AS = E.Sv.c
E : Irradiation solaire en fonction de l'orientation et de l'inclinaison [W]
Sv : Surface de vitrage [m2]
c : Facteur solaire
f = AG/D
f : Rapport des apports gratuits sur les pertes
μ = f(f, inertia class)
B = D - μAG
B : besoins en chauffage [kWh]
1 irradiation solaire
2 température extérieure
3 Perte de l'enveloppe du bâtiment
4 Classe d'inertie
5 Surface de vitrage et apports solaires

Figure 48. Méthode des Degrés Jours Unifiés

4.3.3 ALGORITHME GÉNÉTIQUE INTERACTIF MULTIOBJECTIF AUX SOLUTIONS PERFORMANTES ET DIVERSIFIÉES

Auteur :

Xavier Marsault, MAP-ARIA

4.3.3.1 PRÉAMBULE

De nombreux problèmes de conception ou de décision dans le bâtiment sont traduits sous forme de programmes mêlant des phases de génération et d'optimisation combinatoire, notamment en synthèse de formes (Kicinger, 2006), (Marin, 2010) ou pour l'aide à la décision *multicritère* (Baverel et al., 2012). Ce couplage, destiné à réduire drastiquement l'espace des solutions explorables, doit fournir un nombre de solutions optimisées suffisamment faible pour être étudiées en pratique. Or, les techniques de l'optimisation exacte s'appliquent peu dans le champ de l'ingénierie conceptuelle, et on doit recourir à des méta-heuristiques performantes inspirées des systèmes naturels, comme les algorithmes génétiques (biologie de l'évolution), les algorithmes de colonies de fourmis (éthologie), capables de calculer des solutions optimisées (approchant les optimales) en temps raisonnable. Comme elles sont généralement assez efficaces, on se contente d'en parfaire le fonctionnement pour le problème traité : c'est tout l'objet de nos recherches en informatique.

Le projet EcCoGen analyse la créativité d'un utilisateur en phase amont de conception d'un bâtiment, stimulée par un processus génératif couplé à un algorithme génétique interactif visant à optimiser des paramètres environnementaux. Les objets produits sont des architectones, morphologies architecturales issues de divers traitements morphogénétiques. Les algorithmes et l'interface sont développés en Java sous l'API Processing, et l'évaluation des fonctions de fitness est faite par le logiciel Rhinocéros/Grasshoper (figure 1).

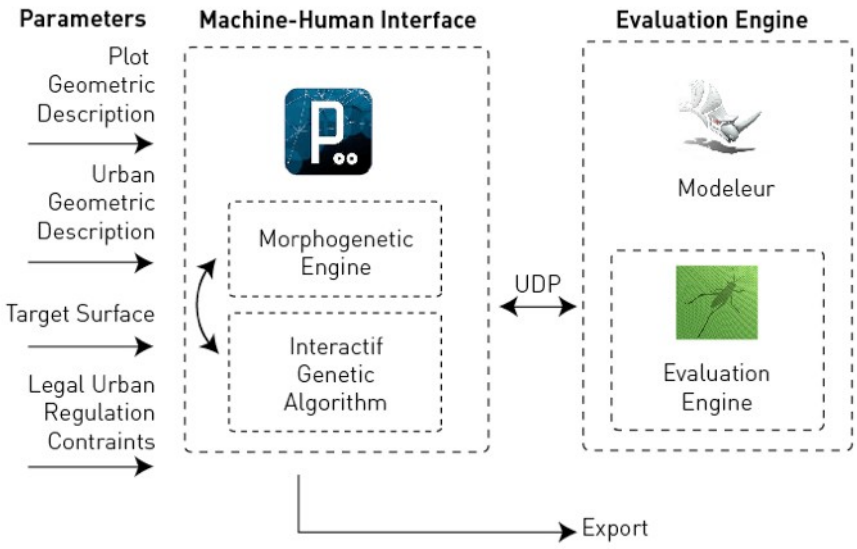


Figure 49. Schéma synthétique d'EcCoGen

4.3.3.2 OPTIMISATION MULTI-OBJECTIFS COUPLÉE À UN IGA : GÉNÉRALITÉS ET ATTENTES

On désigne par IGA un algorithme génétique (AG) où l'utilisateur peut interagir avec le processus et les populations, et intervenir particulièrement dans les étapes de sélection et de mutation. En posant des choix dans un éventail de solutions présentées, l'utilisateur peut orienter de manière plus diversifiée l'évolution de l'algorithme génétique. La principale difficulté est de trouver un compromis entre l'optimisation pure et le maintien des zones d'intérêt et de directions de recherche privilégiées dans le paysage de recherche.

Pour cela, un bon IGA doit suivre les choix de l'utilisateur en leur assurant une certaine persistance, qui ne doit être ni trop courte (pour laisser à l'AG le temps de s'en imprégner), ni trop longue (pour ne pas brider la diversité de l'exploration vers d'autres zones potentiellement intéressantes). Comme dans (Quiroz et al., 2008), on peut souhaiter garder des solutions « objectivement moins bonnes » si elles sont amplifiées par des choix répétés de l'utilisateur, ce qui relativise la notation performantielle à ce niveau. On parle alors d'optimisation marginale, et l'on évite les méthodes coûteuses en temps de calcul (recherche locale, par exemple) pour se concentrer davantage sur la diversité.

En optimisation multiobjectif, on essaie toujours de trouver une bonne approximation du front de Pareto (FP), ensemble des solutions non dominées, c'est-à-dire au moins aussi bonnes que toutes les autres sur l'ensemble des objectifs, et meilleures sur un objectif au moins. Ces solutions, par définition, ne sont pas comparables entre elles : c'est à l'utilisateur, au final, de choisir, en faisant intervenir des critères non quantifiables. C'est bien le propre d'un IGA, dont le but est de trouver des configurations satisfaisant au mieux les exigences de l'utilisateur. Et l'on fait souvent l'hypothèse que ces solutions doivent se trouver quelque part sur le front de Pareto, parce qu'on se dit que l'utilisateur préférera forcément une solution non-dominée à une solution dominée.

Dans un mode de fonctionnement mixte, l'utilisateur peut de temps en temps laisser l'AG repartir sur de l'optimisation pure, sans orienter nécessairement le processus à chaque itération. Ce va-et-vient contraint l'AG à sélectionner des parents potentiels au sein d'une population plus variée, issue elle-même en partie de choix antérieurs de l'utilisateur (peut-être peu cohérents).

Enfin, pour éviter la fatigue ou la lassitude de l'utilisateur liée à un nombre de choix dans le temps qui peut être trop élevé, on doit favoriser la convergence rapide de l'IGA vers la frontière efficiente tout en maintenant la diversité au sein de la population et parmi les solutions optimales, ce qui est souvent contradictoire. C'est pourquoi nous avons choisi d'implémenter la méthode ACROMUSE (Mc Ginley et al., 2011), qui favorise la convergence vers des solutions diversifiées et performantes. Cette méthode robuste exploite davantage le paysage de recherche que les techniques conventionnelles : on obtient souvent des optima nouveaux, même après des centaines d'itérations.

4.3.3.3 TRAVAUX ANTÉRIEURS

4.3.3.3.1 L'IGA DE QUIROZ

(Quiroz et al, 2008) décrivent leurs recherches concernant un IGA en mode coopératif, qui s'appuie sur l'algorithme NSGA-II (Deb et al., 2002), et utilise classiquement un tournoi binaire de Pareto pour la sélection des parents. Dans une autre publication (Quiroz et al, 2009), ils donnent des recommandations pour diminuer la fatigue de l'utilisateur et favoriser en même temps la convergence rapide vers des solutions optimisées.

La principale originalité de leur travail est de construire à chaque itération une « fitness virtuelle interpolée » pour orienter l'IGA vers le choix de l'utilisateur. Ce choix se voit alors associé une fitness virtuelle maximale, et les autres solutions sont évaluées en se basant sur les similarités dans l'espace des critères avec ce choix,

pour leur attribuer une fitness virtuelle proportionnelle à cette similarité. Il est ensuite possible de poursuivre l'AG de manière normale en utilisant ces nouvelles fitness, pour optimiser le choix de l'utilisateur. Il faut noter que dans ce cas, la fitness virtuelle n'est plus capable de tenir compte de la qualité objective d'une solution, mais seulement de son importance subjective. Cette façon de faire nous a semblé un peu artificielle et plus lourde à implémenter que la méthode MOGLS de Jaszkiewicz décrite plus bas.

Une autre avancée de leur travail est relative à la persistance d'une solution choisie par l'utilisateur. Pour éviter que les choix IGA ne disparaissent trop vite de la population, Quiroz ajoute une fitness supplémentaire qui vaut 1 pendant un certain temps (ce qui la maintient dans le FP), puis décroit. Par ce biais, ils modifient artificiellement le comportement de NSGA-II pour suivre une direction de recherche imposée par l'utilisateur pendant un temps suffisant pour influencer les populations. Mais ils ne disent rien sur la possibilité de prendre en compte plusieurs choix.

En ce qui concerne l'interface, ils ont proposé bien avant nous quelque chose de très similaire, avec la possibilité de régler les taux de variation en cours de run, et de partager un espace de solutions avec d'autres utilisateurs. Leur espace élite est un carré de 9 solutions, choisies sur les 3 premiers fronts de Pareto, et affiché chaque fois que l'on stoppe le processus (toutes les K itérations).

4.3.3.3.2 LE MOGLS DE JASZKIEWICZ

Il s'agit d'une autre méthode d'estimation du front de Pareto, de type AG stationnaire (SSGA), dont le but est de trouver un ensemble de bonnes solutions non-dominées en utilisant une fitness unique, combinant aléatoirement les N objectifs indépendants f_i. L'algorithme original (Mutli Objective Genetic Local Search) est dû à (Ishibuchi et al, 1996). A chaque itération, après une étape de sélection, une nouvelle solution est obtenue par crossover, puis améliorée par une méthode de recherche locale selon la « fonction scalarisante » en cours, qui consiste à optimiser une somme pondérée des critères, dont le jeu de poids $\{\lambda\}$ est tiré aléatoirement à chaque itération (1). On donne un signe à chaque λ_i qui indique si on maximise ou on minimise le critère associé. La nouvelle solution remplace alors, dans la population, la solution de moins bonne fitness.

$$\|f\| = \sum_i \lambda_i . f_i \text{ avec } \sum_i \lambda_i = 1 \qquad (1)$$

En 2001, Jaszkiewicz montre que l'algorithme MOGLS, bien que basé sur une agrégation linéaire des critères le rapprochant des méthodes de « programmation par but », ne permet d'accéder qu'aux zones convexes du FP. En 2002, il propose une version plus efficace de MOGLS, où la somme pondérée est remplacée par « les fonctions scalarisantes de Tchebycheff » (2). Plus adaptées que les fonctions linéaires, elle permet d'accéder aux zones concaves du front de Pareto, lorsque celui-ci est non convexe.

$$\|f\| = \max_i (\lambda_i . f_i) \qquad (2)$$

Dans (Carpentier, 2008), l'auteur fait observer que dans cette classe d'algorithmes hybrides, la partie génétique (dépourvue de mutation) tient un rôle d'exploration alors que la recherche locale, dévolue à l'intensification de la recherche, est très coûteuse en temps de calcul. Ce qui fait qu'on peut choisir dans un premier temps de ne pas l'implémenter, d'autant que l'optimisation maximale n'est pas le premier but recherché avec un IGA. A la place, il montre qu'un fonctionnement de type « stratégie d'évolution ($\mu + \lambda$)-ES » permet d'obtenir de MOGLS d'excellents résultats, plus rapidement. Rappelons que dans ce type de stratégie, la population de μ parents + λ enfants se voit réduite à μ parents à chaque itération. Dans toute la suite, cet algorithme - que nous avons implémenté dans EcCoGen - sera désigné par MOGLS-($\mu + \lambda$)-ES.

L'utilisation des fonctions de Tchebycheff favorise la recherche de solutions diversifiées, les coefficients $\{\lambda\}$ étant générés aléatoirement (3) par l'algorithme, dans une région de $[0,1]^n$, étant donnée une variable aléatoire X comprise entre 0 et 1.

$$\lambda_1 = 1 - \sqrt[N-1]{X}\,;\, \lambda_k = \left(1 - \sqrt[N-1-k]{X}\right).\left(1 - \sum_{i=1}^{k-1} \lambda_i\right);\, \lambda_N = 1 - \sum_{i=1}^{N-1} \lambda_i \qquad (3)$$

En pratique, on évalue des fitness « normées » entre 0 et 1, pour s'affranchir des différences d'amplitude. Ainsi, à chaque itération on évalue les bornes inférieures et supérieures de chaque fitness f_i, ce qui permet de définir la norme de Tchebycheff (4).

$$\|f\|_\lambda = \max_i \left(\lambda_i . \overline{f_i}\right);\, \overline{f_i} = \frac{f_i - min(f_i)}{max(f_i) - min(f_i)} \qquad (4)$$

Optimisation directionnelle et IGA

(Ishibushi et al., 2002) suggèrent une amélioration de leur algorithme en utilisant dans la phase de « recherche locale » une direction d'optimisation adaptée à chaque solution et indépendante du jeu de poids courant, permettant de séparer l'évolution génétique de l'exploration du voisinage des solutions. Même si nous n'utilisons pas de « recherche locale », nous nous sommes inspirés de cette méthode d'optimisation directionnelle pour diriger l'effort de recherche en mode interactif, une fois que l'utilisateur a désigné ses préférences. Il suffit de déduire les coefficients {λ'} de la « norme induite de Tchebycheff » (5), laquelle optimise le classement des critères f_i associés au choix de l'utilisateur sur l'espace de recherche.

$$\lambda_k^{'} = \frac{\prod_{j \neq k} f_j}{\sum_{i=1}^{N} \prod_{j \neq i} f_j} \qquad (5)$$

Ensuite, on utilise l'algorithme MOGLS comme une suite d'optimisations mono-objectifs (en bloquant à chaque nouveau choix les valeurs {λ'} pour les itérations suivantes). Si l'utilisateur émet plusieurs choix, on obtient un échantillonnage de l'espace des préférences qu'on utilisera pour construire une distribution substituée à la distribution uniforme $[0,1]^n$.

4.3.3.3.3 MAINTIEN DE LA DIVERSITÉ AU SEIN D'UNE POPULATION

En recherche monocritère, le maintien de la diversité d'une population vise à éviter d'être piégé dans des minima locaux, et en recherche multicritère, un objectif supplémentaire est de garantir la répartition uniforme des solutions le long du front de Pareto. Les AG ont une « tendance naturelle à dériver » vers une zone particulière de la frontière de Pareto (Goldberg, 1989), et pour contrecarrer efficacement ce phénomène, on agit :

- *en amont* : en encourageant la convergence vers le front de Pareto (ou les maxima globaux) tout en maintenant la diversité de la population dans l'espace des critères, mais aussi au niveau génétique. Ici, on peut noter que MOGLS est conçu pour favoriser la première diversité (car il utilise une nouvelle pondération des fitness à chaque itération), tandis qu'ACROMUSE (cf. plus bas) favorise plutôt la seconde.

- *en aval* : on utilise des mesures de la densité locale de la population dans l'espace des critères pour favoriser l'exploration des zones les moins fréquentées. Ce mécanisme est activé lors de la mise à jour de la population courante, où l'on va soit pénaliser les zones les plus denses lors de la sélection pour la reproduction, soit en retirer des individus lors de la mise à jour de la population courante. Une des meilleures solutions de mesure de la densité locale est l'algorithme PADE (Population size Adaptive Density Estimation), non paramétrique (Elaoud et al., 2008). PADE est convoqué pour réduire la taille de la population dès que celle-ci dépasse une valeur limite qu'on se fixe au départ. Pour cela, il divise l'espace des critères par une hypergrille dont les dimensions et le nombre de cellules sont calées sur la population courante. Appliqué avec MOGLS, PADE retire itérativement les individus de densité locale maximale et de

moins bonne fitness selon la fonction scalarisante en cours.

4.3.3.3.4 ACROMUSE (ADAPTATIVE CROSS-OVER MUTATION AND SELECTION)

ACROMUSE est un algorithme génétique mono-objectif récent (Mc Ginley et al., 2011), qui adapte automatiquement les taux de cross-over, mutation et pression de sélection en fonction de l'état de la population courante. Son but de est maintenir une population d'individus à la fois diversifiée et performante, capable de s'adapter rapidement à l'évolution du paysage de fitness, notamment multimodal. Le bassin de reproduction est divisé en 2 populations d'invididus : ceux qui subissent un crossover et de faibles mutations, et ceux qui subissent de fortes mutations (figure 2). Une mesure de diversité génétique de la population (SPD) est utilisée pour adapter les taux de croisement et de forte mutation, tandis que la pression de sélection (nombre *T* d'individus participant au tournoi) est contrôlée par une autre mesure (HPD) couplant diversité génétique et performance. Le taux de mutation est aussi adapté à chaque individu par la prise en compte de sa performance (moins elle est élevée, plus l'individu est susceptible de muter). La sélection des individus se fait en fonction de leur contribution *hpd* à la mesure HPD, plutôt que sur leur fitness pure. ACROMUSE réalise ainsi un très bon équilibre entre exploration et exploitation, mais nécessite dans sa version d'origine, l'estimation de tois paramètres : les valeurs maximales de SDP et HPD (SPD_max, HPD_max) et la pression de selection maximale (T_max = | P | / k, k étant fixé à 6 par les auteurs, mais pouvant faire l'objet d'un réglage plus précis).

4.3.3.3.5 UTILISATION D'UN AG COMME SOLVEUR DE CONTRAINTES

Les AG ne transmettent pas en général la consistance (respect des contraintes imposées) : des parents consistants donnent peu d'enfants consistants. Pour résoudre ce défaut, on peut utiliser des mécanismes de réparation (coûteux en temps, pénalisant les capacités d'évolution), des opérateurs génétiques ad-hoc qui garantissent la consistance des solutions produites, mais perdent de leur efficacité lorsque le nombre de contraintes augmente, ou encore le relâchement de contraintes, qui consiste une tolérance sur laquelle on peut agir. Une autre solution consiste à transformer en objectifs certaines contraintes, ce qui augmente la complexité en terme de calculs, la taille du FP, et l'on favorise l'émergence de solutions aléatoires ou sans intérêt.

De meilleurs résultats sont obtenus quand on tolère une certaine part d'inconsistance dans les solutions, ce qui a pour effet de ne pas trop perturber l'évolution, et l'on parvient souvent ainsi à faire baisser le taux d'inconsistance en introduisant une fonction z de pénalisation des fitness. Une bonne manière de traiter ce problème consiste à intégrer la notion de consistance dans la relation de dominance (Deb, 2011), en effectuant des tournois de sélection basés soit sur la fitness, soit sur la minimisation de l'inconsistance :

$$x \leq y \Leftrightarrow (z(x) \leq z(y)\, ou\, (z(x) = z(y)\, et\, x < y)) \quad (6)$$

Une méthode encore plus récente permet de redéfinir la relation de dominance grâce à la contrainte-dominance (Coello, 2007). Avec MOGLS, puisqu'on n'utilise pas directement la fonction de dominance, on se sert de la fonction scalarisante courante *f(x)* définie par la norme de Tchebytcheff pour pénaliser la fitness lors de l'étape de sélection (en maximisation) :

$$f_z(x) = f(x)\, si\, z(x) = 0, min(f) - z(x)\, sinon \quad (7)$$

4.3.3.4 CONCEPTION D'UN IGA MULTIOBJECTIF AUX SOLUTIONS PERFORMANTES ET DIVERSIFIÉES

La méthode basée sur MOGLS et adaptée par Carpentier été choisie préférentiellement à la méthode de Quiroz basée sur NSGA-II : elle est un peu plus simple à mettre en œuvre (Tableau 1), permet une

implémentation naturelle d'ACROMUSE et apporte plus de flexibilité pour diriger proprement un effort de recherche à partir des choix de l'utilisateur en mode interactif.

Notre contribution est triple : hybridation de MOGLS avec ACROMUSE, extension des capacités d'ACROMUSE au cas multiobjectif (nettement favorisé par MOGLS) et amélioration notable de son fonctionnement, et enfin développement d'une technique d'apprentissage en mode interactif.

Critère	NSGA-II de Quiroz	MOGLS de Jaszkiewicz modifié par Carpentier
Fitness	N fonctions pour N objectifs, avec profondeur de dominance	N fonctions, mais une pondération aléatoire est effectuée mais en 2002, l'auteur montre que le norme sup balaie l'intégralité du FP
Initialisation d'une population Sélection	Une population aléatoire de P individus Tournoi binaire au sens de Pareto : la comparaison est faite sur le rang et la distance de peuplement	Une population aléatoire de P individus (+ des coefficients λ aléatoires) Tournoi T-aire par sélection aléatoire de T parents : la comparaison est faite avec la fonction scalarisante en cours
Remplacement	Elitiste	Ajout à la population courante avec limitation de taille par PADE + traitement séparé du Front de Pareto
IGA	Pareto ranking + distance de peuplement + configuration dominants / dominés	Traitement avec la norme de Tchebytchev (avec ou sans agrégation), supporte la partie concave du FP (à la différence de la combi linéaire)
Orientation du processus AG vers l'espace IGA	Translation des choix dans l'espace des fitness (position des critères Dans les sous-populations d'objectifs, fitness relative,..) Quiroz utilise une interpolation de fitness par rapport aux choix IGA	Optimisation suivant les coefficients λ calculés pour un ou plusieurs choix Travailler dans l'espace de distribution des λ induits
Persistance des choix d'IGA	Traitée avec par « fitness bias », non dominés pendant un temps, et Injectés dans le top 10% de P	Traitée avec des marqueurs phéromonaux
Proposition d'une nouvelle population avec IGA	Toutes les K étapes, les solutions étant prises sur les 3 premiers fronts de Pareto	Toutes les K étapes, les solutions sont issues de la technique de Carpentie
Préservation de la diversité	Pour éviter la dérive génétique : correction de densité locale – niching / sharing	Favorisée en amont par MOGLS (choix aléatoires des coefficients λ). ACROMUSE et PADE assurent la diversité des populations

Table 1. résumé comparatif des implémentations IGA de NSGA-II (Quiroz) et de MOGLS (Carpentier)

4.3.3.4.1 GÉNÉRATEUR D'OBJETS ARCHITECTURAUX

On définit un scénario d'aménagement par un environnement bâti (figures 4,5) et une parcelle vierge qui est découpée en une grille orthogonale 3D dont la trame au sol est paramétrable mais fixe, et dont le nombre d'étages maximal est fixé par l'utilisateur via l'interface. Chaque cellule de la grille ou voxel représente une unité spatiale. Certaines cellules peuvent être interdites, permettant ainsi la prise en compte des contraintes réglementaires ou d'alignement. Le volume capable (VC) délimite et décrit ainsi l'ensemble des possibles occupations cellulaires par des unités d'habitation, chacune ayant une fonction programmatique (bureau, logement,...) et des propriétés (matérialité, opacité, caractéristiques énergétiques). Le nombre de ces unités (contrainte programmatique) peut être strict ou avec une tolérance, ou libre d'évoluer (approche plus exploratoire).

4.3.3.4.2 DESCRIPTION DÉTAILLÉE DE NOTRE ALGORITHME

Les composants. L'algorithme que nous avons conçu comprend 5 modules : le MOGLS-(μ+λ)-ES de Jaszkiewicz modifié par Carpentier, ACROMUSE, PADE, IGA phéromonal et un moteur de satisfaction de contraintes (figure 2). L'IGA phéromonal constitue notre plus forte contribution, mais l'agencement des modules et les améliorations substancielles de certains font partie de notre contribution.

Structure du génôme : le codage génétique suppose que tous les blocs du VC sont indicés. A chaque indice sont affectés : un « gène de forme » qui est un indice binaire d'occupation (0 ou 1) et un « gène de fonction » (ex : 1 = bureau, 2 = commerce, 3 = logement, 4 = espace annexe). D'autres gènes pourront coder ultérieurement des propriétés de façades. Une telle structure conserve les « schémas génétiques » et la « consistance topologique » lors de l'application des opérateurs de variation. Les X-over et les mutations se font aux mêmes endroits le long des chromosomes, et l'on reste toujours à l'intérieur du VC.

Puisque le mécanisme ACROMUSE est basé sur la diversité génétique, on choisit une représentation à plusieurs chromosomes (ici, 2 chromosomes pour les gènes forme et fonction). Ceci permet aussi de séparer l'évolution de la forme de l'évolution des fonctions, et simplifie l'écriture des opérateurs de mutation.

Par ailleurs, on stocke aussi sur l'un des chromosomes des valeurs calculées (fitness, hauteur effective du bâti, appartenance au front de Pareto,...).

Populations : l'AG gère 3 types la population courante, le front de Pareto (front local des élites non dominées) et le front de Pareto global de tous les runs basés sur un même jeu de paramètres. La population intiale est créee « pseudo consistante » vis-à-vis de la contrainte programmatique. Elle peut être aussi calée sur le front de Pareto global, en vue d'optimisations poussées à partir des meilleures solutions antérieures. Sa taille (base 100) peut être quelconque.

Contraintes : la contrainte programmatique concerne la spécification du volume ou de la surface à bâtir, assortie d'une possible tolérance. Pour la résoudre, on définit la fonction z de pénalisation comme l'écart entre la surface imposée et sa valeur mesurée pour une solution. Une autre contrainte est traitée en mode interactif (cf. §IGA).

ACROMUSE

Extension au cas multi-objectifs : dans la version de 2011, Acromuse est une technique mono-objectif. Pour l'utiliser avec plusieurs objectifs, nous avons très naturellement remplacé sa mono-fitness par la fonction scalarisante de MOGLS, moyennant quelques ajustements mineurs.

Sélection

Bien que le tournoi binaire (T = 2) ait été démontré comme le meilleur pour MOGLS de Jaszkiewicz, il n'est en plus de même dans l'approche MOGLS-(μ + λ)-ES sans recherche locale hybidée par ACROMUSE. T individus sont toujours tirés aléatoirement dans la population courante, avec remise, mais le meilleur est choisi selon sa contribution *hpd*. Nous avons travaillé sur le réglage du paramètre k de la pression de sélection maximale | P | / k, via de nombreux tests. Ce réglage semble peu dépendant du problème. Dans tous nos essais, la taille du bassin de reproduction est fixée à 50, pour éviter des temps de calculs trop élevés par itération. Les opérateurs crossover et mutation s'appliquent ensuite sur les candidats du bassin, et les nouveaux individus sont intégrés à la population courante.

Crossover et mutation

On obtient de bons résultats avec le crossover uniforme (interversion aléatoire des gènes des chromosomes parents) et la mutation multipoint. Les gènes forme et fonction mutent séparément mais s'échangent en même temps.

Nous avons montré que les mesures (SPD, HPD) doivent être faites sur la population totale avant l'étape de réduction, ce qui n'était pas clairement précisé par McGinley. Nous avons aussi montré qu'il est préférable, pour accélérer la convergence, d'utiliser des valeurs dynamiques de SPD_max et HPD_max, mises à jour à chaque itération en fonction des valeurs du run les plus fortes. Ces deux améliorations conduisent à une convergence plus rapide vers les optimaux locaux ou la frontière de Pareto.

Indépendemment de la technique de Deb pour adapter la fitness à l'inconsistance, l'AG doit être capable d'ajuster son taux de mutation pour limiter le nombre de solutions fortement inconsistantes qui pénalisent l'évolution de la population et ralentissent la convergence. Certes, le fait d'augmenter la tolérance diminue l'inconsistance et permet de converger plus vite, mais ce n'est pas le bon moyen. Lorsque la mutation favorise trop l'inconsistance (ex : gène de forme), une diminution du taux de X-over au profit d'une augmentation du taux de mutation est opérée, en conjonction avec un diminution adpatative de la probabilité de mutation. La première se base sur le nombre d'individus non-consitants, tandis que la seconde utilise l'inconsistance moyenne.

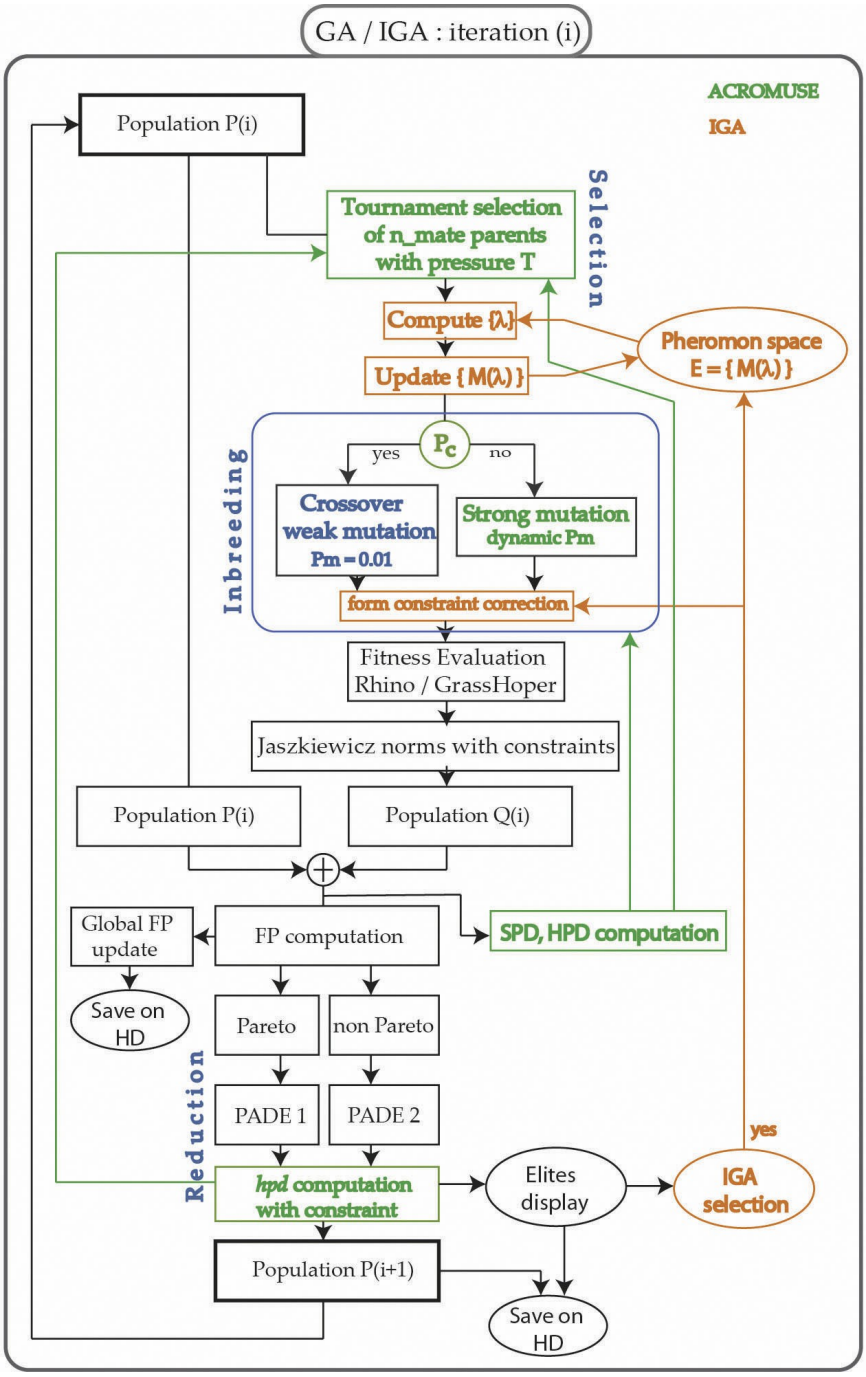


Figure 50. Organigramme détaillé d'une itération de l'algorithme génétique

Remplacement

L'étape de remplacement, proche de la méthode utilisée par Carpentier dans sa thèse (Carpentier, 2008), utilise l'algorithme PADE. Mais le retrait se fait en éliminant dans une case de densité maximale de la grille un individu de plus faible contribution à l'indice de diversité/performance HPD (au lieu de la fonction scalarisante courante). On commence par appliquer PADE au front de Pareto seul si sa taille dépasse un seuil fixé pour l'instant à 40% de |P|. Ensuite, on considère la population non parétienne. Soit on retire itérativement les solutions les moins consistantes jusqu'à revenir à la taille de population désirée, soit le nombre de solutions de consistance minimale excède toujours la limite de taille, et la population est réduite

par PADE.

Fonctions de fitness : actuellement dans EcCoGen, on s'intéresse au plus à 5 fitness : 1-compacité (maximiser), 2-apports solaires en façade l'hiver (maximiser), 3-apports solaires en façade l'été (minimiser), 4-ombres portées sur les bâtiments du voisinage (minimiser), et 5-confort lumineux (maximiser). La figure 3 montre un détail d'évaluation des fitness (1,2,4) dans *Rhinicéros/Grasshoper*.

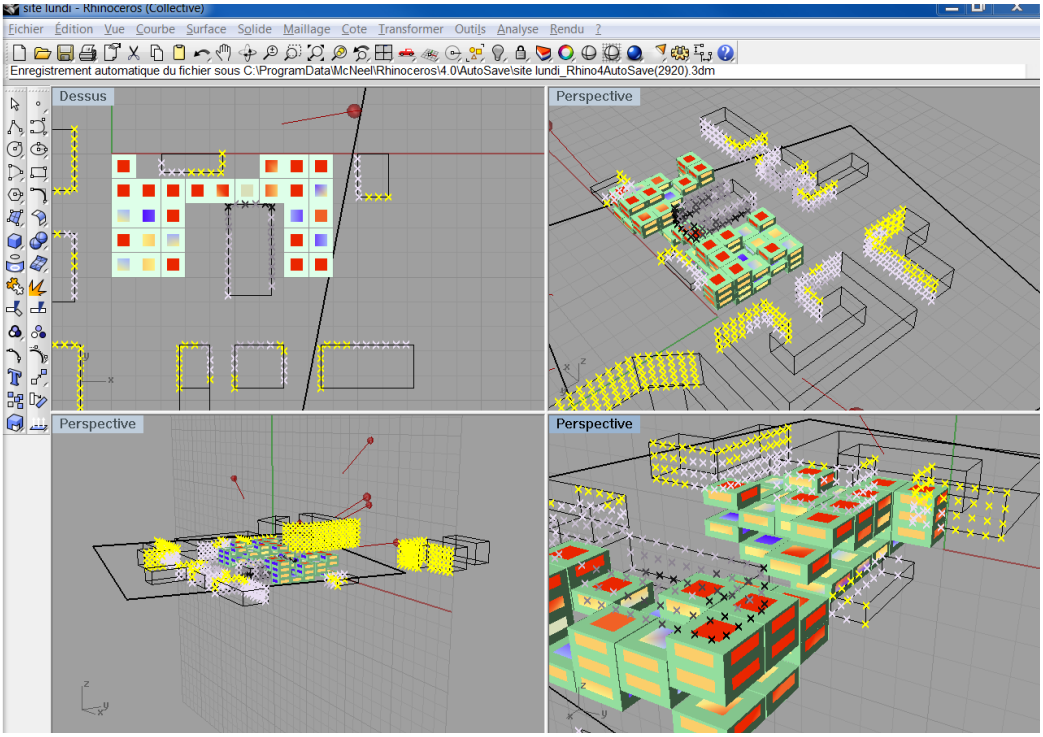

site lundi - Rhinoceros (Collective)
Fichier Édition Vue Courbe Surface Solide Maillage Cote Transformer Outils Analyse Rendu ?
Enregistrement automatique du fichier sous C:\ProgramData\McNeel\Rhinoceros\4.0\AutoSave\site lundi_Rhino4AutoSave(2920).3dm
Dessus
Perspective
Perspective
Perspective

Figure 51. Evaluation automatique des fitness d'un analogon dans l'environnement de calcul Rhinicéros / Grasshoper

IGA

Un bon IGA doit laisser la population évoluer tout en « ressemblant à » un espace de solutions choisies au cours du run par l'utilisateur (adaptation), sans même connaître ses motivations (apprentissage implicite). Or, on sait que le critère de forme est fondamental pour un architecte. On va donc l'utiliser, conjointement à la performance mesurée par les fitness, pour établir des directions de recherches privilégiées dans le paysage des solutions proposées.

Ceci est réalisable assez simplement en munissant la distibution stochastique des {λ} induits de marqueurs phéromonaux *M(λ)*. Rappelons que dans la nature, les fourmis se déplacent et se dirigent en déposant des phéromones, substances olfactives volatiles qui jouent le rôle de mémoire collective. Ce concept forme la base de la méta-heuristique ACO (Ant Colony Optimization), utilisée notamment en optimisation combinatoire, en se servant de traces de phéromones pour marquer les éléments qui favorisent les meilleures solutions (Angus et al., 2009).

Le principe que nous avons adopté est le suivant : lorsqu'une solution est choisie par l'utilisateur, on la stocke avec son « λ induit » et sa forme dans un espace de distribution E. On définit une fonction *Ressemblance(λ)* qui compare les indices d'occupation du VC d'une solution avec ceux de la forme associée à *λ*. La *ressemblance globale* n'est rien de plus que la somme sur E du produit *M(λ).Ressemblance(λ)*.

A chaque itération de l'IGA, un seul couple (λ, forme) est sélectionné dans E (comme dans ACO) grâce à un

tirage stochastique par roulette basé sur les marqueurs M. Ensuite, on laisse l'AG poursuivre son évolution normale, mais en s'arrangeant pour satisfaire la contrainte de *ressemblance globale*. Pour y parvenir efficacement, on définit un opérateur de variation « ad-hoc » pour fournir directement des solutions consistantes, c'est-à-dire dont la ressemblance formelle est au moins égale au seuil de 72%. Nos tests montrent qu'en dessous de ce seuil, la ressemblance se perd assez vite au cours des prochaines itérations.

On affiche pour chaque élite cet indice de ressemblance globale, efficace pour aider l'utilisateur à faire de nouveaux choix. De plus, si l'ensemble des indices de ressemblance affichés est mauvais durant plusieurs itérations successives, cela indique à l'utilisateur que les choix faits ne sont pas cohérents avec les précédents, ce qui peut l'aider, là encore, à décider autrement, s'il le souhaite.

Si l'utilisateur le souhaite, il peut aussi utiliser une distribution phéromonale supplémentaire pour les fonctions des unités du VC, pour contraindre l'AG à tenir compte de choix fonctionnels en plus de la forme.

La récompense phéromonale est basée sur la répétition des choix dans E, et non sur la performance (dont tient déjà compte la pondération λ). Elle a lieu à la fin de chaque itération, puis on met à jour les marqueurs M en appliquant le mécanisme d'évaporation, dont le taux varie de 0.05 à 0.1 :

$$M = M\left(1-\varepsilon\right) \quad (8)$$

Ce mécanisme permet de : renforcer les choix répétés de l'utilisateur, ainsi que toutes les solutions qui leur sont proches, diminuer l'influence des choix anciens. Si l'on n'est pas en mode IGA, *les marqueurs M* ne sont pas pris en compte, et subissent seulement l'évaporation temporelle.

4.3.3.5 DESCRIPTION DE L'INTERFACE

L'interface – développée par Renato Saleri (MAP-ARIA) – est le lieu d'interaction entre l'utilisateur, l'algorithme génétique et les populations calculées. Elle permet de contrôler simplement l'ensemble du processus d'évolution génétique et ses nombreuses options. Elle dispose de 2 vues : une vue d'ensemble (figure 4) des 9 élites sélectionnées à chaque itération (où le mouvement libre de la souris permet d'effectuer une rotation identique pour toutes les solutions, afin de pouvoir les comparer sous différents points de vue), et une vue perspective (figure 5) permettant d'observer chaque solution dans son contexte urbain et de se déplacer autour. On peut visualiser les analogons par couche de voxels pour en visualiser l'intérieur. L'interface gère trois populations :

1. la population courante, de taille variable P de 100 à quelques centaines d'individus, visualisable à la demande,
2. la sélection S des « coups de cœur », de faible taille (12 cases) : c'est la population des « élites privilégiées »,
3. le front de Pareto global M de tous les runs lancés avec les mêmes paramètres, visualisable à la demande.

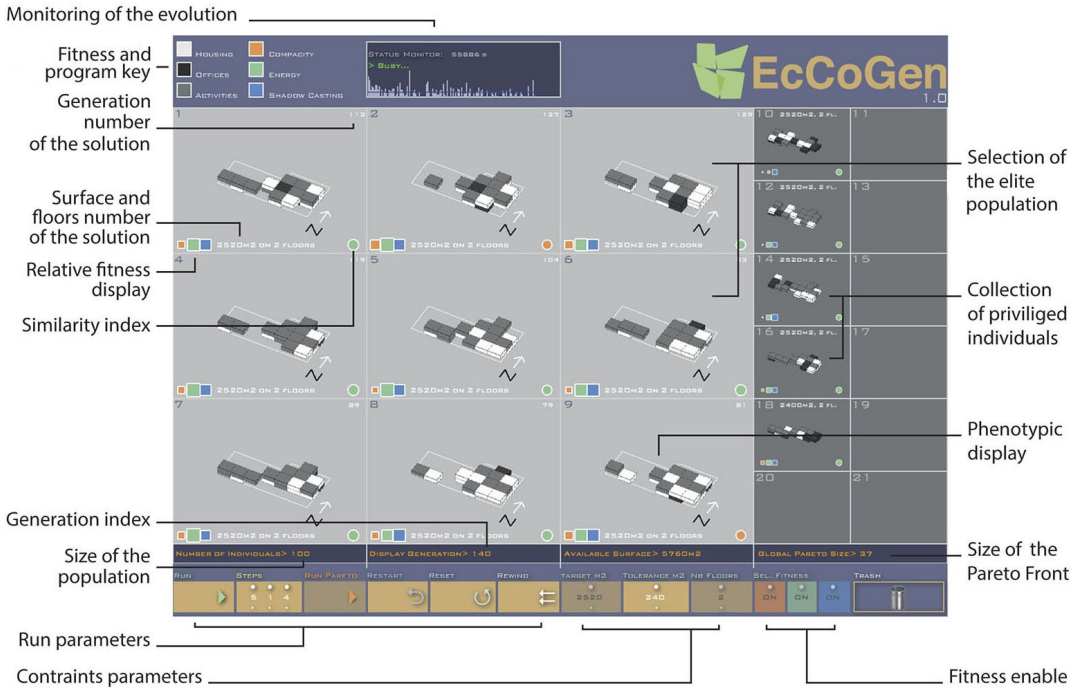


Figure 52. Vue d'ensemble de l'interface avec les élites affichées, les coups de cœur et le monitoring

Toutes les *K* itérations (K étant ajusté pour diminuer le temps d'attente de l'utilisateur, ou choisi par lui), l'interface affiche un sous-ensemble A de solutions élites du front de Pareto, distinctes et diversifiées.

L'utilisateur passe en mode IGA dès qu'il sélectionne une ou plusieurs solutions parmi A et S, l'algorithme travaillant ensuite dans l'espace des coefficients λ induits par ce choix multiple et l'espace de ressemblance formelle.

On peut transférer par un simple « drag and drop » une ou plusieurs solutions de A ou M vers S (mise en mémoire préférentielle), et de S vers A (hybridation, relance).

Il est possible de revenir en arrière dans le processus, car on peut se trouver dans une impasse (plus de propositions intéressantes durant plusieurs itérations), ou bien il n'y a plus d'optimisation possible (un AG qui a convergé n'a pratiquement plus aucune chance de se diversifier ! Même avec MOGLS hybridé par ACROMUSE, au bout de quelques centaines d'itérations).

Le processus étant déterministe (dépendant d'un germe stocké à chaque run), le bouton « relance » permet de repartir avec la même population initiale (même germe, mêmes paramètres). On peut aussi activer le bouton « reset » pour partir sur une population initiale différente (nouveau germe) et changer des paramètres.

Prise de connaissance des performances

Chaque solution est légendée par :

1. un « graphique à pastilles» visualisant les valeurs relatives de chaque fitness par rapport aux meilleures obtenues depuis le départ pour l'ensemble des solutions consistantes,
2. un indicateur coloré de ressemblance / cohérence avec les choix IGA permettant de visualiser en un coup d'oeil la pertinence locale et globale des solutions proposées,
3. le numéro d'itération qui l'a générée (« l'âge » de la solution).

Enfin, l'utilisateur peut suivre en permanence l'état d'avancement de l'évolution grâce à un double graphe de mesure : évolution, diversité/performance. La mesure de diversité est basée sur un mix SPD / HPD, et celle

de l'évolution est basée, dans l'espace des fitness, sur la comparaison entre deux FP successifs (il suffit simplement de sommer sur les différents éléments la distance euclidienne entre les éléments les plus proches dans les deux fronts). Cette mesure est robuste : elle fonctionne même si les fronts sont de taille différente.

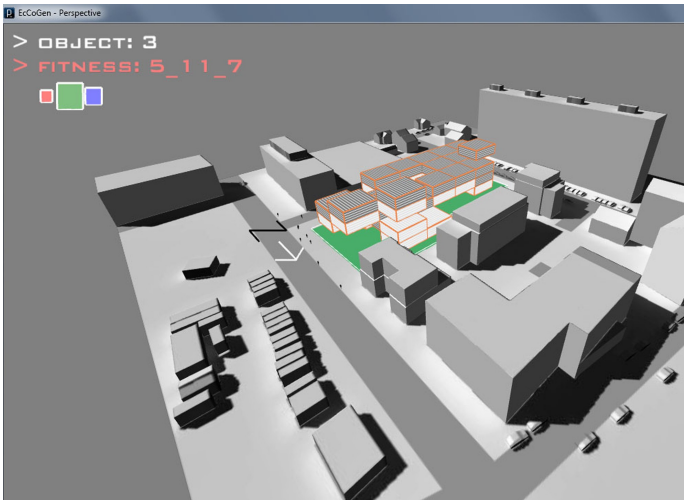


Figure 53. Vue perspective de l'interface avec visualisation d'une solution dans son site

4.3.3.6 RÉSULTATS

Il est difficile de comparer notre algorithme, complexe par sa construction modulaire, avec d'autres AG existants, plus simples. Il est indéniable que l'intégration d'ACROMUSE et des améliorations que nous lui avons apportées constitue un point fort de ce travailorienté vers la créativité, donc bénéficiant bien justement d'une bonne capacité à optimiser dans la diversité. Il a été minutieusement testé en mode mono-objectif et sur plusieurs groupes d'objectifs. Le module IGA, quant à lui, bénéficie aussi de cette diversité, même si elle est canalisée par l'utilisateur dans des niches préférentielles.

La figure 6 présente un cas d'optimisation sur 3 objectifs énergétiques (fitness 1,2 et 4). Le programme est bâti sur 2 étages, avec une surface imposée de 2520m^2 et une tolérance de 240m^2. L'utilisateur a sélectionné très tôt des formes privlégiées pour l'IGA, et l'on montre 30 individus de Pareto bien diversifiés, obtenus après 300 itérations.

4.3.3.7 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Dans ce projet, nous avons développé un algorithme génétique mutil-objectif interactif qui répond aux exigences de diversité, de performance et d'adaptation aux choix variables d'un concepteur en phase d'esquisse. L'étude de cas s'appuyait sur trois fitness liées à la minimisation de la consommation énergétique, et n'intégrait pas encore les paramètres de confort. Or, on sait qu'il suffit d'oublier certains critères pour que le problème soit mal posé : c'est de loin plus important pour l'architecte que la méthode d'optimisation utilisée pour le résoudre.

Figure 54. Exemple d'optimisation sur 3 objectifs énergétiques – élites du front de Pareto et 4 individus-cibles sélectionnés dans les premières itérations pour l'IGA

Du point de vue de l'interaction, la possibilité de modifier manuellement une solution au niveau de son génotype ou de son phénotype (ex : pouvoir geler des positions du volume capable) apparaît souhaitable mais n'a pas encore été traitée dans EcCoGen.

Du point de vue évolutionnaire, il est rare que le processus d'optimisation d'une forme initiale débouche sur un « saut qualitatif » si la morphogenèse n'a pas été conçue dans ce sens. Pour étendre les capacités de morphogenèse de l'outil, une piste de recherche prometteuse est la notion de protéome (Lefort-Mathivet, 2007), qui consiste à séparer le processus évolutionnaire en trois domaines, comme en biologie : les gènes, les protéines et les cellules/tissus/organes produits avec les protéines. Ceci pourrait se décliner pour un bâtiment de la manière suivante : les protéines représentent les matériaux, les assemblages, les procédés, les

règles de construction, les techniques architecturales ; les gènes sont les codants d'une sélection intelligente de ces protéines, et des solutions qualitativement nouvelles peuvent émerger du comportement de l'AG, grâce à l'intermédiaire du protéome.

Enfin, nous avons essayé, autant que possible, d'augmenter les vitesses de convergence sans nuire à la diversité requise pour favoriser la créativité. Cette question généralement délicate devrait faire l'objet de recherches plus approfondies, même si l'utilisation des GPU hautement parallélisés rend aujourd'hui capable d'accélérer nettement la phase la plus consommatrice d'un AG : l'évaluation des fitness. Selon les cas, (Maitre et al., 2009) parlent de facteurs 7 à 1000.

4.3.3.8 BIBLIOGRAPHIE

Angus D., Woodward C., 2009. Multiple objective ant colony optimisation, *Swarm Intelligence*, Springer, vol. 3, p. 69-85.

Baverel, O., Peuportier, B., Rivallain, M., 2012. Decision aiding & multi criteria genetic optimization for existing buildings holistic energy retrofit, Symposium *Materiality in its contemporary forms*, Ile d'Abeau, France.

Carpentier, G., 2008. Approche computationnelle de l'orchestration musicale, optimisation multicritère sous contraintes de combinaisons instrumentales dans de grandes banques de sons, IRCAM, Thèse de l'Université Paris VI.

Coello, C.A., Van Veldhuizen, D.A., Lamont, G.B., 2007. Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems. Kluwer Academic Publishers, Springer.

Deb, K., Agrawal, S., Pratap, A., Meyarivan, T., 2002. A fast and elitist Multi-objective Genetic Algorithm : NSGA-II, IEEE transactions on evolutionary computation, vol 6, n°2.

Deb, K., 2011. Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms: an Introduction, Department of Mechanical Engineering, KanGAL Report Number 2011003, Indian Institute of Technology Kanpur.

Elaoud, S., Loukil, T., Teghem, J., 2007. The Pareto Fitness Genetic Algorithm : Test Function Study, European Journal of Operational Research, no. 177, 1703–1719.

Goldberg, D.E., 1989. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Addison Wesley.

Ishibuchi, H., Murata, T., 1996. Multi-Objective Genetic Local Search Algorithm, *Proc. of 3rd IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, pp. 119–124.

Ishibuchi H., Yoshida, T., Murata, T., 2002. Balance between genetic search and local search in hybrid evolutionary multi-criterion optimization algorithms.

Jaszkiewicz, A., 2002. Genetic local search for multiple objective combinatorial optimization. *European Journal of Operational Research.*

Kicinger R., Arciszewski T., 2006. Empirical analysis of memetic algorithms for conceptual design of steel structural systems in tall buildings, George Mason University, USA.

Lefort-Mathivet, V., 2007. Evolution de second ordre et algorithmes évolutionnaires : l'algorithme RBF-Gene, Thèse de Doctorat de l'Université de Lyon, INSA de Lyon.

Maitre, O., Lachiche, N., Clauss, P., Baumes, L., Corma, A., Collet, P., 2009. Efficient Parallel Implementation of Evolutionary Algorithms on GPGPU Cards, EuroPar Parallel Processing, Springer LNCS 5704.

Marin P., 2010. Exploration des mécanismes évolutionnaires appliqués à la conception architecturale. Thèse de Doctorat en sciences de l'Architecture, Université de Nancy.

Mc Ginley, B., Maher, J., O'Riordan, C., Morgan, 2011. Maintaining Healthy Population Diversity Using Adaptive Crossover, Mutation and Selection (Acromuse), IEEE Transactions on *Evolutionary Computation Volume*:15 Issue:5, pp. 692 – 714.

Quiroz, J.C., Sushil, J.L., Banerjee, J.L., 2008. A model of creative design using collaborative interactive genetic algorithms, *Design Computing and Cognition DCC'08,* Springer.

Quiroz, J.C., Sushil, J.L., Banerjee, J.L., Dascalu, S.M., 2009. Reducing User Fatigue in Interactive Genetic Algorithms by Evaluation of Population Subsets, *Rapport IEEE*.

4.3.4 APPLICATION ET UTILISATION EC-CO-GEN-L – MANUEL DE FORMATION DES EXPÉRIMENTATIONS EC-CO-GEN-L

Auteur :
Hervé Lequay, MAP-ARIA

EcCoGen-L est un logiciel destiné à aider l'architecte à élaborer des solutions architecturales éco-performantes. EcCoGen-L est adapté aux toutes premières phases de la conception, lorsqu'il s'agit, dans un climat et un contexte urbain donnés, de composer les formes générales d'un édifice en fonction de différents critères qui garantiront un niveau de performance suffisant au regard des exigences environnementales : économie d'énergie, confort thermique, minimisation de l'impact sur le voisinage.

EcCoGen-L est un logiciel en cours de développement. Les critères pris en compte dans cette version sont peu nombreux : les solutions proposées ne peuvent être performantes dans toutes les dimensions qui font d'un projet architectural un projet réussi. Par exemple, EcCoGen-L n'évalue pas les solutions sur le plan de la fonctionnalité, de la construction, de l'économie. Aussi, les propositions faites par EcCoGen-L demandent à être retravaillées pour répondre aux autres contraintes qui s'appliquent à tout projet d'édifice.

4.3.4.1.1 6.1.5.1 PRINCIPES GÉNÉRAUX D'ECCOGEN

Les outils génératifs

EcCoGen-L appartient à la famille des outils génératifs. Le principe est le suivant : le logiciel va générer un certain nombre de solutions, qu'il va ensuite évaluer suivant certains critères, dans ce cas liés à la performance énergétique. Certaines solutions seront jugées efficaces, elles seront croisées entre elles pour générer d'autres solutions. EcCoGen-L va essayer d'atteindre deux objectifs : parcourir un espace de solutions très grand en assurant la plus grande diversité des objets proposés (diverger), et en même temps augmenter l'efficacité des familles de solutions qui paraissent les plus adaptées à la situation (converger).

EcCoGen-L ne trouve pas LA solution la plus efficace. Il permet de parcourir une portion d'un univers très vaste de milliards de solutions possibles, et de trouver quelques familles de solutions potentiellement efficaces pour les critères que l'on aura choisis. A chaque fois qu'on lance EcCoGen-L, pour les mêmes données initiales de site et de programme, il trouvera sûrement d'autres familles de solutions tout aussi efficaces.

EcCoGen-L peut fonctionner sans intervention humaine : il passera son temps à essayer d'améliorer les familles de solutions déjà trouvées, et de temps en temps à faire émerger d'autres familles.

Mais il peut fonctionner également en mode interactif. Dans ce cas, à chaque présentation de solutions, l'utilisateur va indiquer à EcCoGen-L les solutions qui lui semblent intéressantes parmi celles qui sont affichées à l'écran : le logiciel leur donnera plus de chance d'être préservées ou d'être croisées avec d'autres pour les générations suivantes. Les critères de choix de l'utilisateur n'appartiennent qu'à lui : ils peuvent être esthétiques, fonctionnels, constructifs, comme ils peuvent être basés sur une analyse des performances calculées par EcCoGen. Par exemple, l'utilisateur peut choisir de privilégier la compacité de la forme plutôt qu'un autre critère énergétique. Mais, même si EcCoGen essaye de préserver les caractéristiques des objets sélectionnés, il continuera quand même à essayer d'en optimiser l'ensemble des performances. Il faut donc observer et évaluer les solutions présentées à chaque génération pour savoir guider EcCoGen.

Morphogenèse

Pour EcCoGen-L, l'espace se découpe suivant une grille en 3 dimensions, dont chaque case représente une "unité fonctionnelle". Une unité fonctionnelle peut représenter un logement pour un immeuble d'habitation, une unité de bureaux pour un immeuble tertiaire, une petite surface de vente pour un édifice commercial. Les dimensions de ces unités, toutes identiques pour une session donnée, peuvent être ajustées en fonction de la taille finale de l'édifice à concevoir. Typiquement, l'unité fonctionnelle peut représenter un volume parallélépipédique de 10m x 10 m au sol sur 4 m de hauteur (de surface à surface de dalle).

Ce découpage de l'espace en "voxels" (volumes élémentaires) est un choix lié à la recherche d'une performance optimale du logiciel : EcCoGen-L élabore des centaines de solutions possibles pour n'en proposer que quelques-unes à l'utilisateur, et doit donc calculer vite. Le découpage de l'espace en voxel permet ce calcul rapide. Il appartient au concepteur de transformer ces voxels, que l'on peut considérer comme la trace visible de points répartis dans l'espace, dans d'autres formes élémentaires que des boîtes.

Les critères d'évaluation des solutions

EcCoGen-L évalue les solutions, dans la présente version, suivant 3 critères liés à l'éco-performance générale :

1 **la compacité des volumes générés** : plus un bâtiment est compact, moins la surface en contact avec l'extérieur est grande, et moins le bâtiment perdra de chaleur en régime hivernal (et moins il en captera en période estivale). En contrepartie, les surfaces de captage de l'énergie solaire gratuite seront moins importantes, et il deviendra plus difficile d'éclairer l'intérieur du bâtiment par la lumière naturelle. D'un point de vue fonctionnel et constructif, un édifice compact verra les circulations entre les différentes parties du bâtiment facilitées, et la structure pourra être simplifiée…

2 **les gains et pertes thermiques** : les surfaces exposées au soleil permettent de gagner de la chaleur, les

surfaces à l'ombre en perdent. L'orientation des surfaces vis-à-vis du soleil, pour différents moments de la journée et de l'année, est prise en compte pour calculer les gains et les pertes. La composition des parois entre en jeu, mais lors de la phase amont de la conception, cette caractéristique n'est généralement pas encore connue : EcCoGen-L utilise des caractéristiques d'une paroi standard, autant en termes de performance d'isolation que de surface de vitrage ;

3 **l'ombre projetée sur les bâtiments avoisinants** : EcCoGen-L tente de minimiser l'impact de la forme du bâtiment sur les autres édifices du contexte, en supposant qu'il faut le moins possible leur masquer le soleil. Le calcul est fait pour des positions moyennes du soleil, tout au long de la journée et de l'année.

La prise en compte du contexte

Le contexte d'opération est caractérisé par un climat et par des contraintes urbaines et programmatiques :

1. le climat définit les caractéristiques du milieu environnant qui seront prises en compte pour le calcul des pertes et gains thermiques, liés à la température extérieure et à l'exposition au soleil ;
2. les règles d'urbanisme autorisent la construction d'immeubles suivant des contraintes précises : retrait par rapport à la voirie, règles de mitoyenneté, hauteur maximale, surface constructible (COS). Ces règles permettent de définir la **surface disponible**, et le "**volume capable**". Dans le cas d'EcCoGen-L, ce volume capable sera matérialisé par une grille en trois dimensions dans laquelle prendront place les voxels ;
3. la forme du contexte urbain est utilisée par EcCoGen-L pour calculer les masques éventuels et l'impact des ombres des solutions sur les édifices environnants ;
4. la "**surface objectif**" à atteindre est fixée par le programme. Une tolérance peut être définie.

Dans la présente version d'EcCoGen-L, les données du site (climat et environnement urbain) sont pré-intégrées. Elles ne sont donc pas modifiables. Seule la grille tridimensionnelle qui définira le volume capable, paramétrée en taille des voxels et hauteur maximale, est modifiable. Elle se charge manuellement à chaque début de session d'EcCoGen-L (voir le chapitre "Une session").

4.3.4.1.2 MISE EN ROUTE D'ECCOGEN-L

EcCoGen-L est composé de briques logicielles de deux environnements distincts qui communiquent entre eux : Processing (un environnement de programmation) et Rhinocéros (un logiciel 3D scriptable).

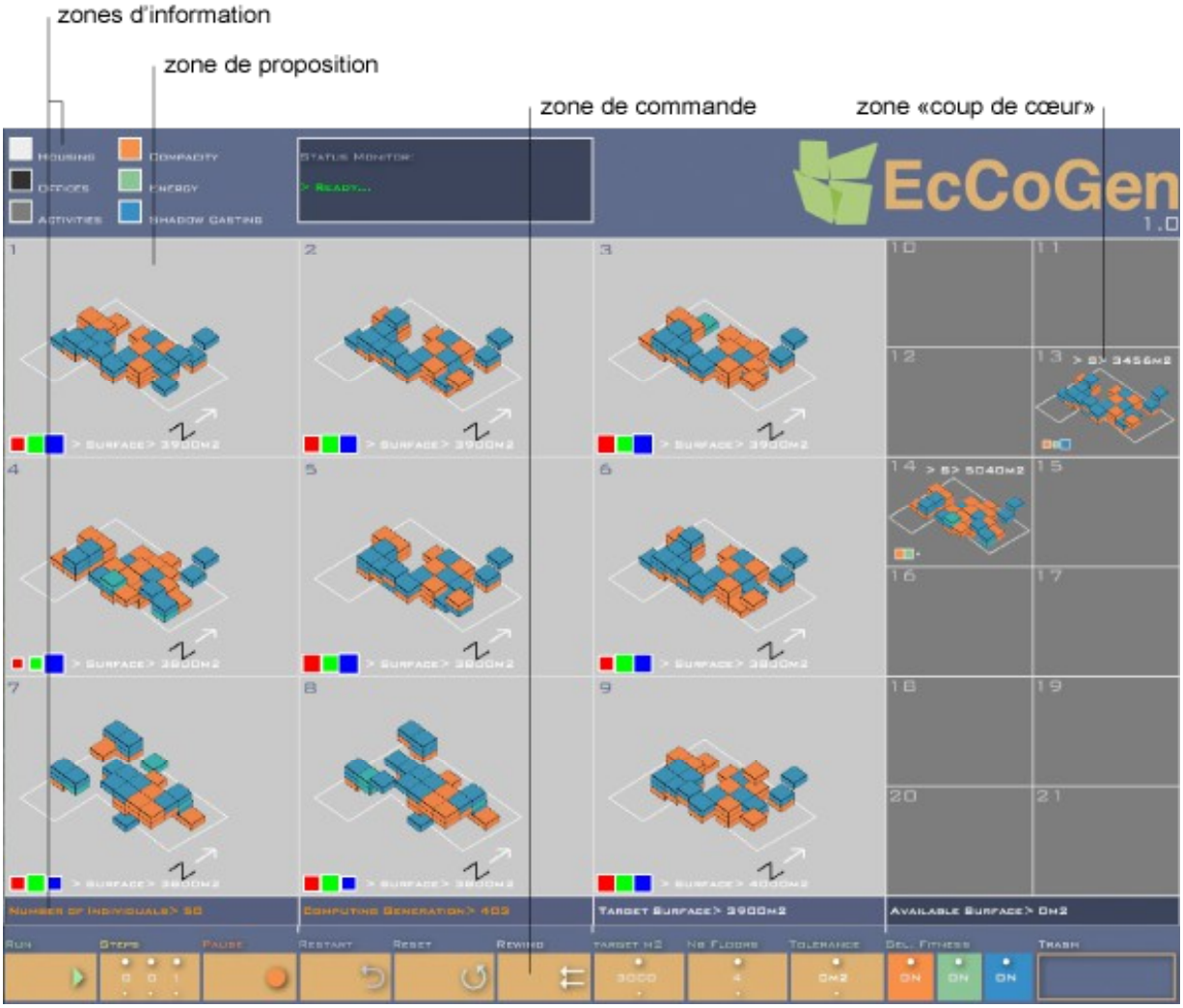
EcCoGen-L ne fonctionne que sur environnement Windows.

Le lancement de EcCoGen-L suit la procédure suivante :

1. ouverture de **Rhinocéros**
2. chargement du fichier 3D décrivant le site
3. chargement du *plugin* Grasshopper
4. ouverture dans Grasshopper du code d'évaluation des performances
5. masquage de Rhinocéros (pour des raisons de performance)
6. ouverture de **Processing**
7. chargement du *sketchbook* EcCoGen-L
8. lancement d'EcCoGen-L.

4.3.4.1.3 L'INTERFACE D'ECCOGEN-L

La fenêtre principale montre au démarrage la trace au sol de la parcelle du projet.



L'interface d'EcCoGen-L se décompose en 4 zones principales.

6 Dans la **zone de proposition** s'affichent les solutions proposées par EcCoGen-L. Ces 9 propositions ne sont pas forcément les meilleures, mais sont représentatives de la diversité des meilleures solutions de la génération en cours.

7 Ces solutions, qui vont changer à chaque nouvelle génération ou "*run*", peuvent être conservées dans la **zone "coup de cœur"** pour être sauvegardées ultérieurement ou réinjectées dans la génération suivante.

8 La **zone de commande** permet de contrôler le comportement de EcCoGen-L.

9 Les **zones d'information** précisent les codes graphiques utilisés, informent sur l'état des simulations et les données programmatiques de la session.

4.3.4.1.4 LA ZONE DE PROPOSITION

9 solutions sont proposées à chaque génération du calcul. Chaque solution est documentée par 3 carrés de couleur correspondant aux 3 critères de performance (compacité, énergie consommée, ombre portée) et par la surface atteinte. Les carrés de couleur donnent une indication relative de performance : plus le carré est grand, plus la performance est grande. L'utilisateur peut privilégier les solutions qui atteignent une grande performance sur un critère, ou celles qui ont une performance équivalente sur tous les critères.

Fonctions de la zone de proposition

La **barre d'espace** du clavier permet de basculer dans une représentation perspective en plein écran, qui permettra de visualiser la solution de la case pointée en situation et sous d'autres angles (voir plus bas les fonctions de la fenêtre perspective).

Un **clic gauche** sur une solution permet de la copier vers une case de la zone "coup de cœur".

Un **clic droit** permet de sélectionner une solution particulière pour demander à EcCoGen-L de s'orienter vers des solutions de ce type pour les générations suivantes. Un clic droit sur une solution sélectionnée la désélectionne.

4.3.4.1.5 LA ZONE "COUP DE CŒUR"

Les solutions proposées génération après génération par EcCoGen-L peuvent être mémorisées dans cette zone de 12 cases. Elles peuvent être déplacées d'une case à l'autre, copiées, effacées, ou sélectionnées pour être réinjectées dans la population en cours de traitement.

Fonctions de la zone "coup de cœur"

La **barre d'espace** du clavier permet de basculer dans une représentation perspective en plein écran, qui permettra de visualiser la solution de la case pointée sous d'autres angles (voir plus bas les fonctions de la fenêtre perspective).

Un **clic gauche** sur une solution permet de la déplacer (ou de la copier avec la touche alt) vers une autre case de la zone, ou vers la poubelle ("*Trash*") en bas à droite de la zone de commande.

Un **clic droit** permet de réinjecter la solution dans la population en cours pour les générations suivantes. Un clic droit sur une solution sélectionnée la désélectionne.

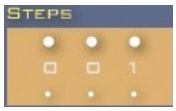
4.3.4.1.6 LA ZONE DE COMMANDE

La zone de commande permet de contrôler le comportement d'EcCoGen-L et de configurer les critères de

sélection des solutions.

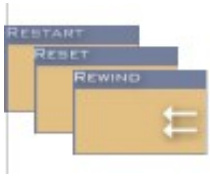
Boutons de contrôle

Le bouton **Run** lance le calcul de la génération suivante de solutions. Entre deux générations affichées successives, EcCoGen-L construit des générations intermédiaires, invisibles, dont le nombre est précisé par le bouton "Steps". Le but est d'accélérer les opérations de divergence-convergence de manière transparente à l'utilisateur. Pendant le calcul de la génération suivante, l'affichage et l'interface sont bloqués.



Le bouton **Steps** permet de modifier le nombre de générations intermédiaires invisibles que EcCoGen-L calculera avant l'affichage des solutions suivantes. Si *Steps* est à 1, alors EcCoGen-L présente directement la génération suivante. Plus ce nombre est élevé, plus les solutions proposées suivantes seront performantes par rapport à celles affichées précédemment, mais plus le temps de traitement sera long. Mettre le nombre de *steps* à 10 ou 30 lors des premiers *runs* permet de n'afficher que des solutions déjà évoluées, et d'aller prendre un café en attendant.

Le bouton **Pause** permet d'interrompre le calcul des générations intermédiaires lorsque *Steps* est supérieur à 1. Le calcul de la génération en cours devra quand même se terminer avant l'affichage des solutions.



Les boutons **Restart**, **Reset**, **Rewind** permettent de recommencer à 0 la génération de solutions, ou de revenir en arrière dans l'historique des générations. *Ces boutons ne sont pas actifs dans cette version*.

Boutons de configuration

La zone **Target** définit la **surface objectif totale** à atteindre pour le programme à concevoir. Elle s'exprime en m^2, mais se compte pour EcCoGen-L en termes de nombre entier d'unités fonctionnelles : si les unités fonctionnelles sont dimensionnées à 100 m^2, par exemple, alors la surface objectif se configure de 100 en 100 m^2.

Le bouton **NB Floors** permet de modifier le nombre d'étages maximal des solutions proposées. La surface disponible "Available surface" affichée sous la zone "coup de cœur" indique la surface obtenue en multipliant la surface au sol par le nombre d'étages désiré.

La zone **Tolerance** définit une tolérance par rapport à la surface objectif totale, et permet à EcCoGen-L de proposer des solutions efficaces plus ou moins proches de la surface demandée.

La zone **Selection Fitness** (performance) permet de choisir les critères de performance qui seront pris en compte dans la session de calcul à démarrer. L'un au moins de ces critères doit être activé. Les boutons de cette zone seront désactivés dès le premier *run*.

La poubelle permet de supprimer des solutions retenues de la zone "coup de cœur".

4.3.4.1.7 LA FENÊTRE DE PERSPECTIVE

La fenêtre de visualisation perspective permet d'examiner sous des angles variés une solution proposée par EcCoGen, en provenance de la zone de proposition ou de la zone "coup de cœur". La fenêtre perspective s'active en déplaçant la souris au-dessus d'une solution et en appuyant sur la barre d'espace.

Fonctions

La **barre d'espace** du clavier permet de revenir à la fenêtre principale.

Les touches **flèche gauche** et **flèche droite** permettent de passer en revue les solutions proposées par EcCoGen-L ou retenues par l'utilisateur. Le numéro de la solution s'affiche en haut à gauche, avec les valeurs absolues et relatives de fitness. Ces valeurs sont encadrées lorsque la solution a été sélectionnée par l'utilisateur pour le *run* suivant.

Les touches **flèche haute** et **flèche basse** permutent entre les différentes caméras de la perspective : l'une est libre, les autres sont placées dans des endroits stratégiques de la scène, notamment dans les rues proches de la parcelle à construire.

La touche **S** permet de sauvegarder une version 3D de la solution affichée, au format DXF.

4.3.4.1.8 UNE SESSION D'ECCOGEN-L

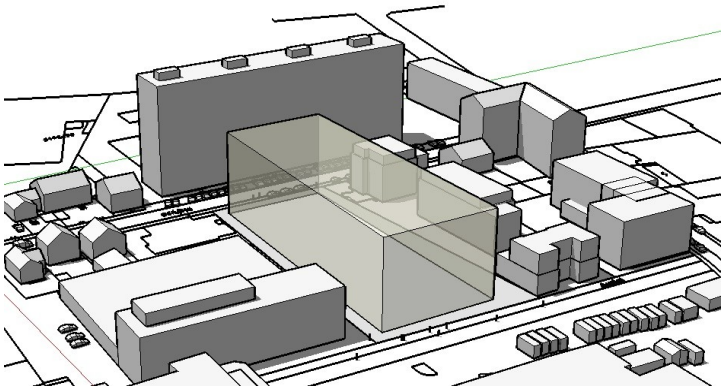
La description du site et du volume capable

Le site (climat et environnement urbain) est déjà intégré dans cette version d'EcCoGen-L.

Le fichier décrivant la grille de voxels dans laquelle prendront place les solutions calculées par EcCoGen a été préparé en amont. Il définit l'emprise au sol de la parcelle (sur une grille 2D), la taille et la hauteur de ces voxels, et le nombre d'étages maximum (qui pourra être modifié en cours de session par le bouton "Nb Floors").

Voici par exemple une représentation en plan et en 3D du site d'expérimentation : une grille de 7 x 4 voxels de 12 x 12 x 4 m, orientée et positionnée en retrait des voiries Est et Ouest.

En vert, les cases-voxels disponibles du volume capable.



Vue 3D du site et du volume capable

Les données programmatiques

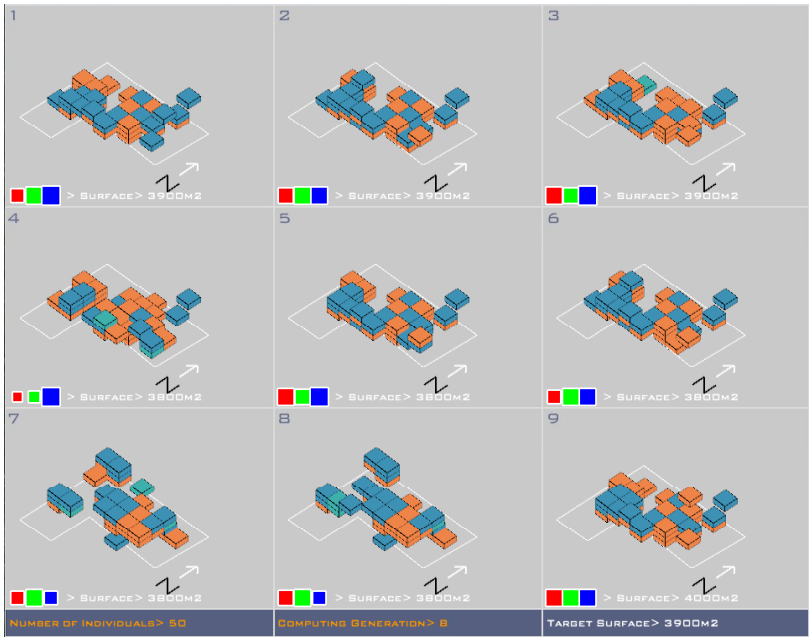
Le paramétrage des données programmatiques se fait en définissant la surface objectif ("Target surface"), la tolérance désirée (en + ou en - par rapport à la surface objectif), et le nombre d'étages désiré.

Dans cette version d'EcCoGen-L, la différentiation des voxels-unités fonctionnelles par leur fonction (logement, bureau, surface commerciale) n'est pas opérante.

Le lancement de la session

Une session commence par un **glisser-déposer** du fichier de grille dans la zone de proposition de la fenêtre principale d'EcCoGen-L. Dès le lâcher du fichier, le logiciel lance l'évaluation de 50 solutions fabriquées au hasard. Au terme de cette phase, 9 solutions s'affichent dans la fenêtre de proposition.

Lors des premières phases de la session, les solutions sont peu performantes, sauf coup de chance. Il faudra attendre une dizaine de générations pour voir émerger des solutions acceptables sur un ou plusieurs critères. Pour calculer ces 10 générations successives, une bonne solution consiste à paramétrer le nombre "Steps" puis à cliquer sur le bouton "Run".



Laisser faire EcCoGen-L ou orienter les solutions

L'utilisateur peut laisser EcCoGen-L travailler, c'est à dire calculer des générations successives (des *runs* séparés par *steps* générations intermédiaires). EcCoGen-L est alors en mode **autonome**.

Il peut également orienter le calcul des solutions suivantes en sélectionnant (clic droit) la ou les solutions qui lui paraissent performantes. On passe alors en mode **interactif**. Les effets de la sélection peuvent ne pas être immédiats : il faudra peut-être plusieurs *runs* et sélections pour voir des solutions converger petit à petit vers une morphologie particulière. Ne pas perdre de vue que le choix d'une sélection, s'il se fait sur des critères esthétiques, peut favoriser des solutions moins performantes que d'autres sur certains critères performantiels : la sélection est donc un acte raisonné.

On peut alterner comportement autonome et comportement interactif, en sélectionnant des solutions particulières puis en laissant EcCoGen-L tenter une convergence et une optimisation des solutions.

Mémoriser les solutions

On peut, à l'issue d'un *run*, mémoriser les solutions intéressantes dans les 12 cases de la zone "coup de cœur". 12 cases seulement sont disponibles : les solutions qui y sont stockées peuvent être déplacées, copiées, effacées. On ne peut les enregistrer en 3D qu'à partir de la fenêtre de perspective.

Visualiser les solutions pour les contrôler et les enregistrer en 3D

Chaque solution des zones de proposition ou "coup de cœur" peut être visualisée dans son contexte urbain dans la fenêtre de perspective (touche **espace**). Depuis cette fenêtre, la touche S provoque l'enregistrement de la solution affichée au format DXF.

Dans Sketchup par exemple, on pourra récupérer en 3D le site et la solution enregistrée, afin de la retoucher, la compléter, l'habiller et la représenter.

Recommencer la session

Au bout d'un certain nombre de *runs*, les solutions proposées par EcCoGen-L convergent vers des familles de solutions qui paraissent stables.

Si l'on veut parcourir d'autres univers de formes, il faut réinitialiser EcCoGen-L en arrêtant son exécution,

puis en le relançant. Il faudra alors reprendre depuis la configuration des données programmatiques.

Stopper EcCoGen-L

Lors de l'arrêt du logiciel, aucune donnée n'est conservée automatiquement. Exporter les solutions affichées dans les deux zones de proposition et de "Coup de cœur" ne peut se faire que manuellement, depuis la fenêtre de perspective, en passant les solutions une par une et en appuyant à chaque fois sur la touche **S**.

5 MISES EN SITUATION PÉDAGOGIQUE

5.1 OBJECTIFS ET PROTOCOLE D'EXPÉRIMENTATION

Auteurs :
Nicolas Gregori SITCOM, InterPSY

Lara Schmitt, SITCOM, InterPSY.

L'objectif de cette tâche est de décrire le dispositif d'observation de l'activité créative des utilisateurs. Il s'agit d'élaborer un protocole dans ses diverses dimensions : objectifs de l'observation, choix des utilisateurs, consigne(s) et conditions matérielles de travail, moyens pour l'enregistrement.

5.1.1 PRINCIPES GÉNÉRAUX DE CONSTRUCTION DES OBSERVATIONS

5.1.1.1 OBJECTIF D'OBSERVATION

Deux environnements numériques de travail sont actuellement en développement :

– Ec-Co-Gen-L (MAP-ARIA, Lyon)

– Ec-Co-Gen-N (MAP-CRAI, Nancy)

Dans les deux cas, l'objectif est le même, observer dans quelle mesure ces environnements numériques assiste la créativité des utilisateurs, sachant que le projet architectural doit être efficace d'un point de vue énergétique. La dimension "ergonomie logicielle", si elle n'est pas complètement absente de l'évaluation, n'est pas centrale. C'est bien la capacité des environnements numériques à faciliter (ou au contraire à contraindre, guider) le processus créatif qui est au centre du dispositif d'observation.

5.1.2 UN TRAVAIL EN BINÔMES, ENREGISTRÉ

Le travail de création est réalisé en binômes. C'est un choix théorique et méthodologique soutenu par deux hypothèses :

– l'interaction est un espace de construction de l'intelligibilité des cognitions ;

– les cognitions sont situées et distribuées, c'est-à-dire qu'elles sont fondamentalement ancrées à la fois dans le rapport à l'autre et dans le rapport à la matérialité ambiante.

Forts de ces propositions, nous mettons en place des situations de collaboration créative de binômes d'utilisateurs travaillant en co-présence et de manière synchronisée, sur un exercice court de conception. Cette activité est médiatisée par les interactions langagières, corporelles, artefactuelles et graphiques des élèves-architectes et de l'outil informatique dont ils disposent. Les utilisateurs doivent être suffisamment experts en architecture afin que l'on puisse effectivement observer la qualité de l'assistance produite dans le cadre d'une éco-conception.

Pour le travail d'analyse des interactions, il est nécessaire de disposer d'un enregistrement vidéo des séances de travail. La scène est filmée sur divers plans permettant de capter le travail réalisé à l'écran et sur le bureau (croquis, notes, manipulation de plans, etc.) aussi bien que l'activité des acteurs eux-mêmes (gestes, postures, mimiques, manipulation d'objets, etc.).

5.1.3 DÉFINITION DES SÉANCES DE TRAVAIL

5.1.3.1 DÉROULEMENT

Quel que soit le cas (Lyon ou Nancy), les observations suivent le même canevas. Les observateurs psychologues sont présents dans la salle afin de prendre des notes sur la réalisation de la tâche. Il serait très utile qu'au moins un collègue impliqué dans les développements informatiques soit aussi présent.

Temps 1 – *Séance de formation à l'utilisation de l'outil informatique*

Cette séance est importante car l'objectif n'est pas d'observer l'apprentissage de l'outil, mais sa capacité à assister la créativité. Pour bien préparer cette partie de la séance, il est important de faire ressortir le principe de fonctionnement de l'outil informatique. La rédaction d'un guide d'utilisation pourrait être réalisé

Durée estimée : 45 minutes

Temps 2 – *Situation de travail*

La consigne est donnée aux utilisateurs qui doivent réaliser la tâche de conception. Ils disposent de l'outil informatique ainsi de matériels pour prendre des notes, dessiner ainsi que d'un plan de l'environnement urbain dans lequel s'inscrit la parcelle.

Durée estimée : 2 heures

Temps 3 – *Questionnaires post-sessions*

Des questionnaires sont distribués à chacun des utilisateurs afin d'évaluer leurs impressions à la suite du travail réalisé. Ces questionnaires servent également à identifier les points à creuser lors des entretiens post-sessions (temps 4). Les questionnaires sont donnés en annexes.

Durée estimée : 10 minutes

Temps 4 – *Entretiens / Debriefing*

La dernière phase de l'observation consiste en un debriefing qui permet aux utilisateurs de donner leurs impressions "à chaud" et de présenter leur projet à l'oral,. Ce débriefing se prolonge par un entretien avec chacun des binômes sur le travail réalisé et le rôle de l'outil informatique dans la production créative. Ces entretiens permettent d'approfondir les résultats des questionnaires. Ils sont également centrés sur les qualités et points faibles de la proposition des binômes tels qu'ils le perçoivent eux-mêmes.

Les entretiens sont animés par l'équipe de psychologues et par au moins un représentant des équipes de développement informatique.

Durée estimée : 1 heure

Notes sur ce temps 4.

Le debriefing / entretien peut être placé dans la même journée que la séance de travail elle-même, auquel cas, il faut une pause de 20 à 30 minutes après le temps 3 afin de permettre (i) aux observateurs de dépouiller les questionnaires et de préparer l'entretien et (ii) aux utilistaurs de souffler un peu et de décanter leur travail. Il peut également être remis au lendemain matin, auquel cas, il faut s'assurer de la disponibilité des binômes.

Le faire dans la foulée a l'avantage de concentrer la mobilisation des binômes sur une demi-journée seulement et de maintenir très frais dans leur esprit le travail réalisé. Le faire le lendemain matin permet

aux utilisateurs de prendre un peu plus de recul par rapport à leur travail et à la manipulation de l'outil. Cela permet aussi de prévoir une séance de travail un peu plus longue (1h30).

Les quatre temps décrits ci-dessus sont indispensables pour répondre à l'objectif d'évaluation de l'assistance à la créativité dans le cadre d'une éco-conception. Il est possible d'en ajouter un cinquième qui permettrait d'affiner plus encore cette évaluation.

Temps 5 – *Auto-confrontations croisées*

Afin d'affiner les analyses produites à partir des observables élaborés lors des temps 1 à 4, il est possible de mener des auto-confrontations avec les binômes, c'est-à-dire de mener une séance de travail au cours de laquelle on confronte les binômes à leur activité filmée afin qu'il explicitent leur propre activité (décisions prises, des manipulations d'objets, etc.). Ce travail a lieu à partir de séquences identifiées par les observateurs pour leur aspect signifiant (incidents, oppositions ou au contraire consensus exprimé, etc.).

Durée estimée par séance : 2 heures

Pour le faire, il faut satisfaire plusieurs contraintes :

– séances d'auto-confrontation réalisées dans une proximité temporelle suffisante pour que les acteurs puissent se souvenir de leur activité ;

– disponibilité des acteurs ;

– délai suffisant pour qu'une première analyse permettent de dégager les séquences soumises à l'auto-confrontation

– participation d'un membre de la partie informatique

En raison de ces contraintes, nous proposons de réaliser ce cinquième temps environ quinze jours après la captation initiale. Cela nécessiterait donc un nouveau déplacement sur Lyon.

5.1.3.2 DISPOSITIF DE CAPTATION DE LA SÉANCE DE TRAVAIL (TEMPS 2) ET MATÉRIEL

La captation est réalisée selon les principes suivants :

observer l'activité des utilisateurs,

tracer ce qui se passe à l'écran,

avoir un plan suffisamment large du l'environnement de travail.

Contrainte : il n'est pas possible d'envisager un enregistrement des actions à l'écran par un dispositif interne car cela ralentirait trop l'activité de la machine. Il faut donc mettre en place un moyen d'enregistrement externe.

Nous utiliserons donc trois caméras.

Une dirigée vers l'écran (ou le double-écran).

Une dirigée vers le binôme.

Une dirigée en plongée vers l'espace de travail (utilisation d'un pied girafe).

Voici le matériel nécessaire pour la captation.

Table de travail sur laquelle l'ordinateur et l'écran (les écrans) sont disposés. Cette table est suffisamment grande pour qu'on puisse y prendre des notes et disposer des documents (plan du site, notamment).

Deux chaises.

Trois caméras numériques et cartes SDHC.

Un pied girafe et deux trépieds (ou, selon, la taille de la table, un trépied et un trépied de table pour la caméra dirigée vers le binôme).

Un microphone de table, relié à l'une des trois caméras. Les autres caméras prennent le son sur leurs micros internes.

5.1.3.3 CONSIGNE(S) DE TRAVAIL

La consigne sera rédigée en fonction des attentes pour chacune des situations (Nancy et Lyon). Si la parcelle de travail est la même, alors on peut construire une consigne quasi-identique, la variation étant relative à l'environnement logiciel mobilisé dans l'un et l'autre cas. Si la parcelle est différente, alors, la consigne variera plus fortement selon les situations.

Points communs de la consigne.

Décrire la situation et donner l'objectif de travail.

Préciser ce que sera le document à rendre

Donner une méthode de travail (liée à l'environnement logiciel).

Insister sur la créativité.

5.1.3.4 QUESTIONNAIRES POST-SESSIONS

Auto-évaluation des résultats

Je suis satisfait du projet que l'on a proposé	☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐
Le concept proposé est :	
nouveau	☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐
original	☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐
écologique	☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐
durable	☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐

inattendu	☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐
intelligent	☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐
esthétique	☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐
utile	☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐
innovant	☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐
créatif	☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐

Questionnaire d'évaluation de l'utilisabilité

« Vous devez indiquer **votre degré d'accord** avec les propositions en cochant les cases correspondantes sur l'échelle en 7 points. Le choix central signifie « ni d'accord, ni pas d'accord » :

Pas du tout d'accord ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ Tout-à-fait d'accord

Le dispositif est utile	☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐
Le dispositif est ludique	☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐
C'est agréable de travailler avec cet outil	☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐
C'est facile de travailler avec cet outil	☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐
Les informations sont bien présentées sur l'interface	☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐
Les informations sont facilement lisibles	☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐
Il est facile de consulter les données	☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐
Les informations présentées sont facilement interprétables	☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐

Il est facile de saisir les données	☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐
Il est facile d'enregistrer des données	☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐
Il est facile de supprimer des données	☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐
Il est facile de retrouver les données auparavant consultées	☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐
Le fonctionnement du dispositif est facile à comprendre	☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐
Le fonctionnement du dispositif est facile à apprendre	☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐
Le dispositif m'a demandé des efforts de mémorisation	☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐
Il est facile d'interrompre une procédure	☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐
Il est facile d'annuler une action	☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐
Les messages d'erreur sont pertinents	☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐
Le dispositif m'a permis d'atteindre les résultats souhaités	☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐
J'ai atteint les résultats souhaités avec un minimum d'efforts	☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐
J'ai fait appel à mon binôme pour réaliser certaines actions	☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐
J'aurais aimé pouvoir consulter un fichier d'aide intégré	☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐
Le temps de réponse du système est satisfaisant	☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐

Autres aspects

Le dispositif a favorisé ma créativité	☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐
Le dispositif a favorisé la créativité collective	☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐

Le dispositif a favorisé la collaboration avec mon binôme	☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐
Le dispositif est adapté pour travailler en conception préliminaire	☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐
Je souhaiterais utiliser ce dispositif dans ma pratique professionnelle	☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐
Je souhaiterais que cet outil soit intégré au programme de formation des étudiants	☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐
Le dispositif m'a permis d'apprendre des modèles environnementaux	☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐

5.2 EVALUATION DES QUALITÉS CRÉATIVES DE LA PERFORMANCE CRÉATIVE ET CARACTÉRISATION DE LA CRÉATIVITÉ EVOLUTIONNAIRE

Auteur :
Nicolas Gregori et Lara Schmitt, SITCOM, InterPsy

L'objectif de cette tâche est d'observer la créativité dans un environnement décisionnel complexe en recourant à un protocole d'observation et d'évaluation des performances des objets conçus. Il s'agit d'évaluer le processus créatif lui-même car c'est ce processus et non pas seulement les résultats obtenus qui supportent, ou non, la créativité des acteurs, même si les résultats peuvent eux-mêmes faire l'objet d'une évaluation en termes de créativité.

La situation a évolué entre le projet proposé et sa mise en place effective. En effet, ce n'est pas un mais deux outils qui ont été développés et soumis aux analyses. Si le protocole d'observation est identique dans les deux cas, la quantité d'analyses à produire est, elle, très largement augmenté avec un potentiel humain identique. Par ailleurs, cela a généré un temps de développement plus long qui a reculé d'autant les premières observations. Dans le projet initial, les premières observations (automne 2011) devaient permettre de relever des points cruciaux pour le développement qui devaient donner lieu à une seconde série d'observation (automne 2012). Les versions prototypes ayant été développées au printemps 2012, il n'aura pas été possible de déployer les deux temps de l'observation et nous en sommes restés au stade de l'analyse exploratoire, sans passer à celle de l'analyse systématique. Pour autant, cette situation a ses intérêts car cela a donné l'occasion d'observer l'usage de deux produits différents pour un objectif identique : assister la créativité dans le domaine de l'architecture. Cela oriente la structuration de ce compte rendu.

Nous commencerons par rendre compte du protocole d'observation et notamment des enseignements méthodologiques qu'il permet de tirer. Ensuite, nous rendrons compte successivement de l'observation de la version lyonnaise d'EcCoGen (EcCoGen-L) puis de la version nancéienne (EcCoGen-N). Nous ferons alors une synthèse globale et poursuivrons par des perspectives pour d'éventuelles suites à ce projet.

Pour identifier les binômes et les acteurs, nous utilisons les références suivantes.

B1L : Binôme 1, expérience de Lyon

B2L : Binôme 2, expérience de Lyon

B1N : Binôme 1, expérience de Nancy

B2N : Binôme 1, expérience de Nancy

EC1L : sujet du binôme 1 placé devant le poste EcCoGen-L, expérience de Lyon

SK1L : sujet du binôme 1 placé devant le poste Sketchup, expérience de Lyon

EC2L : sujet du binôme 2 placé devant le poste EcCoGen-L, expérience de Lyon

SK2L : sujet du binôme 2 placé devant le poste Sketchup, expérience de Lyon

EC1N : sujet du binôme 1 placé devant le poste EcCoGen-N, expérience de Nancy

RH1N : sujet du binôme 1 placé devant le poste Rhino, expérience de Nancy

EC2N : sujet du binôme 2 placé devant le poste EcCoGen-N, expérience de Nancy

RH2N : sujet du binôme 2 placé devant le poste Rhino, expérience de Nancy

5.2.1 PROTOCOLE D'OBSERVATION

Nous faisons ici le point sur le protocole expérimental effectivement mis en place et sur les enseignements à en retenir du point de vue méthodologique.

5.2.1.1 DESCRIPTION DU PROTOCOLE D'OBSERVATION

L'objectif d'observation était de confronter des utilisateurs-cibles (des élèves architectes avancés dans leurs études) à un outil d'assistance à la créativité en développement. Il s'agit donc de comprendre comment ces utilisateurs vont se saisir de l'outil, comment ils vont l'insérer dans des pratiques de conception architecturale. Pour cela, un programme a été élaboré par l'ensemble des partenaires du projet. Si les outils observés sont différents à Lyon (MAP-ARIA) et à Nancy (MAP-CRAI), le programme est le même (Annexe 1).

Pour répondre à cet objectif, nous avons mis en place le protocole d'observation suivant.

Temps préparatoire (Lyon seulement) : Réalisation d'un manuel d'utilisation à l'environnement EcCoGen-L (Annexe 2). Ce manuel doit servir de guide pour la formation qui a lieu au temps 1.

Temps 1 : Formation collective des utilisateurs respectivement à EcCoGen-L et à EcCoGen-N. L'objectif n'étant de tester directement les interfaces, mais de faire utiliser les outils dans un processus créatif, il convenait de forer les utilisateurs à ces outils.

Temps 2 : Consignes de travail, données par binômes, juste avant la conduite du projet.

Temps 3 : Séance de travail elle-même d'une durée prévue de trois heures.

Temps 4 : Renseignement de questionnaires post-session destinés à une auto-évaluation de l'activité et du rôle de l'outil dans la conduite du projet (Annexe 3).

Temps 5 : Debriefing commun réunissant les deux binômes ainsi que les partenaires du projet (MAP-ARIA et SITCOM-INTERPSY à Lyon, MAP-CRAI, MAP-ARIA et SITCOM-INTERPSY à Nancy).

Les temps 1, 3 et 5 ont été filmés, selon ou plusieurs angles selon les cas et le matériel disponible (un seul pour les temps 1 et 5, trois pour le temps 3 de Lyon et 4 pour le temps 3 de Nancy).

En fonction de la disponibilité des sujets, le déroulement des opérations s'est effectué sur deux à Nancy et trois à Lyon.

– Lyon

Veille de l'expérimentation : Temps 1

Jour de l'expérimentation : Temps 2, 3 et 4.

Lendemain matin de l'expérimentation :Temps 5.

– Nancy

Veille de l'expérimentation : Temps 1

Jour de l'expérimentation : Temps 2, 3, 4 et 5.

5.2.1.2 ENSEIGNEMENTS MÉTHODOLOGOQUES

Nous avions planifié un sixième temps, consacré à des auto-confrontations simples et croisées. Etant donné les contraintes liées à mise en place du projet, nous avons dû y renoncer. En revanche, nous avons fait évoluer la séance de debriefing. Initialement, nous avions planifié de rencontrer les binômes séparément. Nous avons finalement choisi de faire témpigner les binômes au cours d'une même session. Si cela ne permet pas d'entrer aussi finement dans des perceptions propres à chacun des binômes, cela a en revanche l'avantage de croiser les expériences et de nourrir un dialogue entre eux. C'est pourquoi, en introduction de séance, nous leur avons demandé de rendre compte de leur travail non pas en s'adressant aux partenaires, mais en le présentant à l'autre binôme. L'objectif était d'éviter un discours de rationalisation pour favoriser ce que les tenants de l'auto-confrontation croisée appellent le ré-adressage, c'est-à-dire le fait que le discours ne serve pas uniquement à décrire des actions ou des représentations, mais qu'ils devienne un moyen d'amener l'autre à penser et à agir selon la perspective de celui qui parle. D'une certaine façon, nous avons cherché à combler l'absence de séance d'auto-confrontations par une situation favorisant autant que faire se peut ce type de dispositif.

Un autre aspect important du debriefing consiste en l'association des partenaires de développement. Ce temps de travail leur permet non seulement de questionner les sujets sur des questions techniques, sur des choix de conception ou encore sur des difficultés rencontrées avec l'outil, mais aussi d'avoir un retour rapide pour le développement de l'outil, ne nécessitant pas le retour, assez long, des études d'usages.

Les questionnaires post-session distribués aux sujets immédiatement après les séances de travail respectives. L'objectif est moins de comparer, puisque les effectifs sont très faibles, mais plutôt d'avoir des indications permettant de préparer les séances de debriefing.

5.2.2 DONNÉES LIMINAIRES

Dans cette partie, nous rendons compte des situations d'un point de vue plutôt quantitatif. Ces données concernent les questionnaires post-sessions ainsi que le déroulement de chacune des quatre situations. Nous présentons ensuite l'analyse globale des deux debriefings réalisés, ce qui permet de poser quelques points avant de procéder à l'analyse qualitative des situations d'utilisation d'EcCoGen-L et d'EcCoGen-N.

5.2.2.1 DONNÉES QUANTITATIVES SUR LES SITUATIONS OBSERVÉES

5.2.2.1.1 LES QUESTIONNAIRES POST-SESSION

Même si, comme cela a été dit plus haut, les questionnaires ne permettent pas de comparer les résultats en termes d'analyse de la créativité, nous pouvons tout de même les observer (Figure 37). Le tableau des résultats complet figure à l'annexe 4.

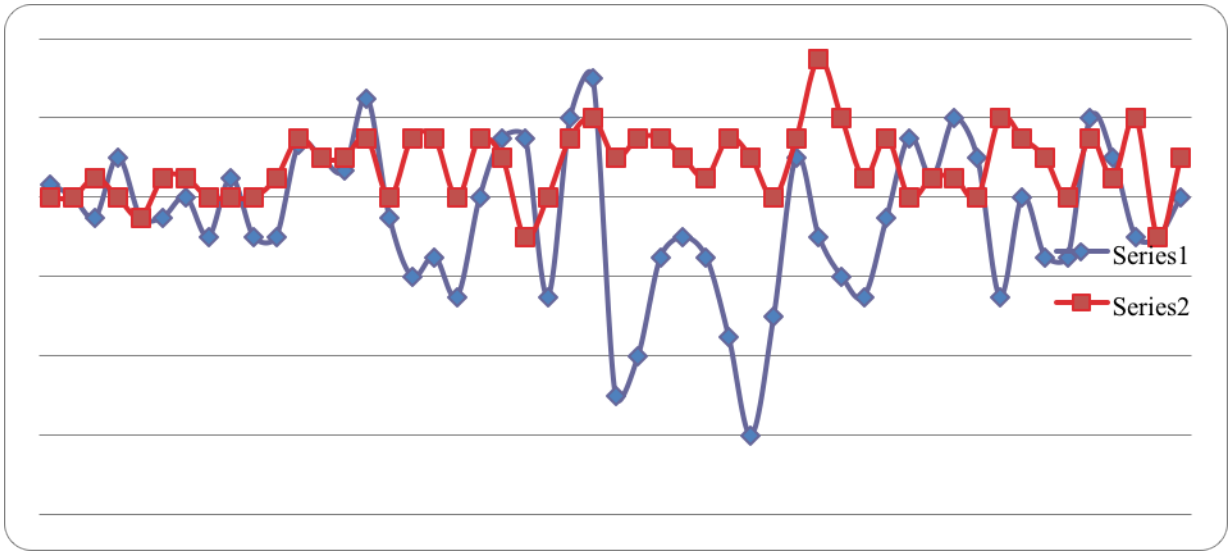


Figure 55. Réponses au questionnaires post-session (Séries 1 = Lyon ; Séries 2 = Nancy).

Un écart apparaît entre les utilisateurs d'EcCoGen-L et d'EcCoGen-N pour quelques items.

17 à 20 : Sur la lisibilité des données de l'interface, moins bien évaluée sur EcCoGen-L que sur EcCoGen-N.

26 à 33 : Sur la charge cognitive plus importante dans EcCoGen-L que dans EcCoGen-N (mémoire, recherche d'individus auparavant sélectionnés, efforts pour atteindre un résultat) ainsi que sur des aspects plus procéduraux (annuler une action) ou d'assistance (auprès du binôme ou d'autrui).

35 à 37 : Sur la moindre capacité d'EcCoGen-L à permettre d'identifier des familles d'individus, de faire le lien entre les critères de performance et de favoriser la créativité individuelle.

43 à 46 : Sur l'intégration de l'outil dans un cadre de formation et sur le soutien à la production d'idée par l'environnement, dans tous ces cas moindre pour EcCoGen-L.

Au vu de l'analyse des situations de travail, une première explication du fait qu'EcCoGen-L apparaît globalement moins performant qu'EcCoGen-N pour les sujets (et tout en conservant à l'esprit que cette "comparaison" doit rester très modeste étant donné les effectifs) relève du registre d'action fondamentalement différent dans les deux cas, EcCoGen-L étart mobilisé dès le début des séances de travail dans l'objectif de créer des espaces à construire alors qu'EcCoGen-N intervient tardivement dans le processus pour contribuer à une conception déjà élaborée par ailleurs par les sujets. Par ailleurs, dans l'expérience lyonnaise, les deux environnements informatiques sont clairement distingués. EcCoGen-L n'est pas Sketchup. Chacun de ces environnements est installé sur un poste spécifique. Ce n'est pas le cas pour EcCoGen-N car les trois environnements de travail (EcCoGen-N, Rhino et Grasshopper) sont certes distribués sur deux écrans mais ne concerne qu'un seulet même poste de travail. Ainsi, il n'est pas aisé de savoir si les évaluations produites par les sujets confrontés à EcCoGen-N ne concerne que ce seul environnement.

5.2.2.1.2 TEMPS PASSÉ SUR ECCOGEN / DURÉE DE LA SESSION

Ainsi que nous venons de le mentionner, les environnements EcCoGen-L et EcCoGen-N sont mobilisés de façons très différentes sur les sessions de travail (Figure 38). La durée initiale (3 heures) a été à peu près respectée par chacun des binômes.

Dans le cas d'EcCoGen-L que cet environnement est très mobilisé durant la première partie de la session de

travail (début à 1h30 environ), en parallèle avec une activité de croquis et d'esquisses, puis qu'il est abandonné au profit de Sketchup qui va permettre aux sujets de développer la solution sur la base des individus sélectionnés dans EcCoGen-L. Ce travail sur Sketchup se poursuit par des dessins de définitions.

Dans le cas d'EcCoGen-N, le travail est d'abord réalisé sur Rhino puis associé à Grasshopper pour poursuivre la définition du projet. L'environnement EcCoGen-N lui même n'intervient que dans un second temps et n'a pas la même fonction que pour EcCoGen-L. Au lieu d'être un outil de création, il est un outil qui poursuit cette création. On note que dans le cas d'EcCoGen, il y a très peu, voire pas, de dessins de type croquis ou esquisse, ce qui tend à montrer que le processus créatif a été réalisé avant la mobilisation d'EcCoGen-N, même si, nous le verrons, EcCoGen-N agit tout de même dans ce champ.

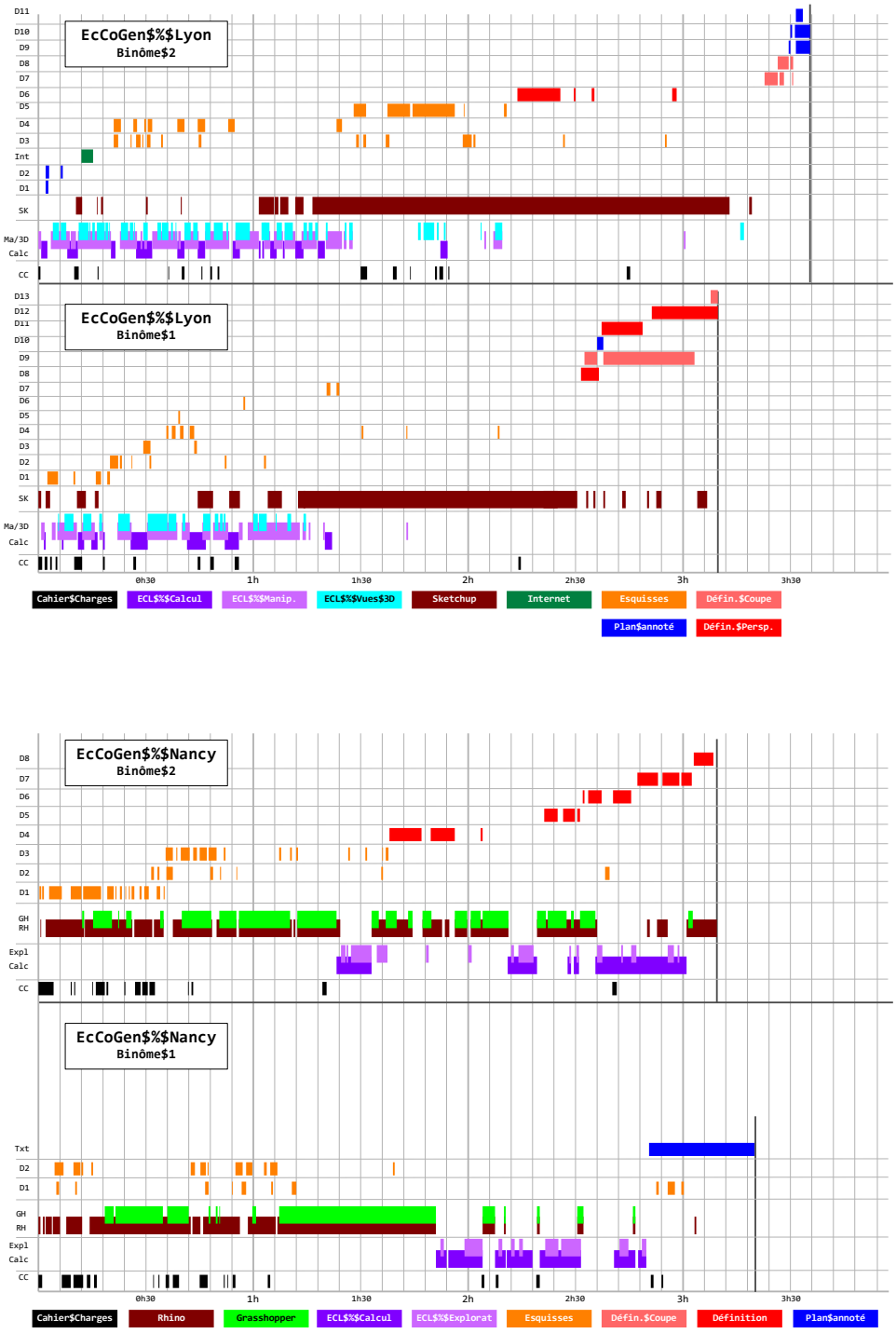


Figure 56. Déroulement des quatre sessions de travail.

5.2.2.2 RETOURS DES BINÔMES LORS DU DEBRIEFING ECCOGEN-L

Les informations qui figurent ci-dessous sont directement extraites du debriefing commun réalisé autour du projet EcCoGen-L. Plusieurs points sont discutés dans cette séance, qui renvoient à la mobilisation d'EcCoGen-L, à celle du logiciel complémentaire Sketchup, aux relations entre ces deux environnements de travail, au scénario de travail ainsi qu'aux améliorations préconisées par les binômes eux-mêmes. Des extraits de *verbatim* accompagnent les dimensions identifiées.

5.2.2.2.1 MOBILISATION D'ECCOGEN-L

A. Comme fournisseur de données

EcCoGen-L est un environnement qui est perçu comme une sorte de "fournisseur" de données ou de formes. Ce sont des sortes de *« gabarit »* (B2L) que les acteurs travaillent ensuite par des croquis et qu'ils spécifient dans Sketchup (B2L : *« on a cherché dans EcCoGen les solutions qui pouvaient évoquer ce dont on avait envie... »*). Ce travail ne concerne que la forme du bâtiment, sa structure (B2L : *« concentrés sur la façade »*), mais pas sur les matériaux.

Ainsi, EcCoGen-L supporte des idées un peu floue de départ (B2L évoque un *« aperçu des masses qui permet de faire le choix »*), ce qui est facilité par une lecture plutôt globale de la forme. En cela, EcCoGen-L s'inscrit dans une démarche de conception dont il est une sorte d'assistant. Cela génère du coup quelques frustrations car les utilisateurs manifestent aussi le besoin d'avoir des informations plus précises, notamment sur la performance de certaines parties des individus (B1L).

Parce qu'il propose des formes dont la performance énergétique est calculée, EcCoGen-L est aussi un soutien aux utilisateurs au sens où il leur donne des arguments techniques qui vont aider dans la discussion ultérieure avec les ingénieurs (B1L et B2L : *« c'est comme si c'était un ingénieur sur ces aspects-là, mais si on déborde sur ce qui touche à l'architecte ça prend un peu de notre rôle »*). Cela leur permet d'éviter de recourir à des formes intuitives en matière énergétique, ce qui est le cas d'ordinaire (B1L : *« on a des résultats facilement et on peut réagir »* ; B2L : *« on a [des préoccupations énergétiques] mais c'est pas facile d'avoir un retour rapide [ce que donne EcCoGen-L] »*). Cela construit un sentiment de confiance envers EcCoGen-L ou soulage une *« angoisse »* (B2L) concernant le développement durable. En effet, les utilisateurs peuvent se dire que la *« solution ne sera pas catastrophique même si c'est pas la meilleure »* (B2L). Toutefois, ce sentiment de confiance peut devenir un risque car il peut entraîner un *« manque de recul »* par rapport aux propositions du logiciel (B2L).

B. Comme support de créativité

EcCoGen-L ne fait pas que donner des informations, il permet aussi de faire évoluer une forme à partir de modèles identifiés (B2L : *« ... et on les a fait travailler entre elles »* ; B2L : *« tout le projet vient de la jonction entre ces deux masses qui viennent s'appuyer par un ruban plutôt opaque »*, ruban qui provient de *« l'observation des gabarits qu'il [EcCoGen-L] nous donnait » et de « ce que ça nous évoquait »*). Il permet de projeter des usages et de croiser une approche environnementale avec une approche plus classique (B2L) ou encore d'assurer la base du positionnement du bâtiment, la créativité personnelle pouvant alors entrer en jeu (B2L). L'intérêt d'EcCoGen-L pour B1L et B2L est donc qu'il permet de faire évoluer l'idée de départ assez vite.

L'assistance à la créativité est aussi liée à la taille des cubes. En effet, si cette taille peut limiter l'évolution de la solution (B1L), elle peut aussi favoriser la créativité en ne définissant pas trop le projet, donc en laissant des incertitudes, de la divergence (B2L : *« ça laisse quand même une liberté assez confortable parce que ça ne contraint pas spécialement dans le programme »*).

Enfin EcCoGen-L autorise un déploiement plus "risqué" dans un temps limité. Sans lui *« on aurait fait des trucs qu'on connaît déjà »*, *« on l'aurait pas axé sur les performances »* (B1L) ou encore *« ça aurait été moins poussé »* (B1L). Cette possibilité est offerte par le fait qu'EcCoGen-L valide des choix de conception faits par les utilisateurs (B1L : *« il nous a proposé oui vous pouvez faire le trou »* ; B2L : *« c'est permis »)*.

C. Limites à la créativité

Cependant, EcCoGen-L peut limiter la créativité dans les contraintes qui sont les siennes (B2L : *« on voulait quelque chose de plus haut mais quand on demandait cinq étages, il nous balançait tout en haut [alors qu'il fallait une surface importante de supermarché au rez-de-chaussée] »*). C'est aussi le sentiment d'être

confronté à des solutions relativement homogènes (B1L et B2L) ou la frustration de devoir conduire une architecture de bloc (B1L et B2L : *« ça contraint pas mal »* ; on fait des *« projets de masse »*).

On note aussi la difficulté de filer une solution dans la suite des générations (B2L : *« très vite ça dénaturait donc on revenait en arrière »*) ou encore la prépondérance de la forme sur les performances (B2L), or si les performances s'améliorent avec les générations successives, la forme qui a prévalu pour la sélection d'un individu se perd, ce qui gène les utilisateurs qui voudraient pouvoir mieux influencer l'évolution des générations d'individus. Enfin, les utilisateurs se plaignent du poids trop important de la performance énergétique alors qu'ils cherchent une forme *« agréable »* (B2L).

5.2.2.2.2 MOBILISATION DE SKETCHUP

Dans les deux cas, Sketchup permet de vérifier des choix de conception par l'intégration, voire la comparaison de modèles issus d'EcCoGen-L (B1L : *« on a gardé le plus performant de chaque modèle »*). Il permet également de vérifier que des choix architecturaux non directement issus d'EcCoGen-L sont satisfaisants en termes énergétiques (B1L : *« vérifier que le soleil permet de faire un accumulateur »*). C'est donc un outil de décision (B1L).

Plus basiquement, Sketchup permet de lieux lire les formes des individus issus d'EcCoGen-L, de mieux en percevoir les caractéristiques physiques (trous, étages..., B1L et B2L).

L'importation dans Sketchup n'est cependant pas toujours très aisée (B2L) et il faut redessiner les blocs, ce qui ralentit la conception (B1L). Ce point est en discussion entre B1L et B2L car, selon SK2L, le fait de redessiner les blocs dans Sketchup est aussi un avantage au sens où cela permet d'exploiter différemment cette unité de base qu'est le bloc selon que l'on considère que c'est effectivement un bloc ou plutôt un gabarit, un support de formes.

5.2.2.2.3 LIENS ENTRE ECCOGEN-L ET SKETCHUP

Ainsi, Sketchup permet de poursuivre l'exploration des individus entreprise dans EcCoGen-L. C'est en outre un logiciel mieux maîtrisé par les binômes. Cette poursuite concerne non seulement la lecture des formes, mais aussi l'exploration de critères de performances qui ne sont pas actuellement dans EcCoGen-L. Sketchup permet de vérifier des performances énergétiques, mais EcCoGen-L permet de les avoir dès le début (B1L et B2L).

5.2.2.2.4 POINTS DE VUE ERGONOMIQUES SUR ECCOGEN-L

A. Lecture / interprétation des individus

Les biomes identifient plusieurs défauts ergonomiques ayant entravé leur travail.

L'impossibilité de voir les étages en vue V9, mais uniquement la masse, ce qui *« complexifie »* (B1L) la lecture des individus proposés (B2L : *« c'est qu'en 3D [VP] qu'on voit où sont les cubes »*).

Le fait de ne connaître que des fitness relatives et non absolues, ce qui rend la comparaison difficile des individus coup de cœur avec les individus de la génération courante (B1L).

Le fait que la fitness globale de l'individu ne permet pas de comprendre quelles sont les parties les plus performantes sur un critère pour chacun des individus (B1L : *« savoir quelles sont les parties performantes dans une solution »*).

Les différences entre les générations qui n'apparaissent pas suffisamment (B1L : *« on a dû chercher en profondeur ce qu'il racontait »* ; B2L : *« on a du mal à voir comment évoluent les paramètres dans les solutions »*).

La difficulté de comprendre pourquoi un individu est efficace, quelles sont les zones les plus performantes afin de pouvoir argumenter par la suite ou pour décider de la conservation de l'individu et de la stratégie évolutionnaire (B1L).

B. Interface

Du point de vue de l'interface elle-même quelques points sont soulignés.

Le manque de vision des paramètres de performance dans les vues en 3D, ce qui empêche de faire un meilleur choix (B1L et B2L).

La difficulté de pouvoir comparer des générations entre elles dans les vues 3D (B1L) car il faut faire défiler tous les individus pour afficher celui qu'on cherche. Ainsi comparer l'objet 9 à l'objet 3 nécessite de faire défiler tous les objets intermédiaires.

Les angles de caméra qui sont fixes en vue 3D alors que les utilisateurs aimeraient pouvoir choisir ces angles eux-mêmes.

C. Aspects collectifs

Le travail collaboratif est intéressant mais pose des limites, y compris du point de vue de la créativité.

EcCoGen-L facilite l'accord au sein du binôme (B1L) car il fournit des objets qu'on peut manipuler. Il permet ainsi d'affiner ce sur quoi on est d'accord (B2L).

Il permet de discuter de la disposition de la masse et impose d'obtenir un accord sur les individus EcCoGen-L avant une importation dans Sketchup pour développer la solution.

Les binômes se sont sentis moins créatif à deux que s'ils avaient été seuls car *« à deux on ne sait pas si les deux accordent la même importance aux critères de performance »* (B2L), ce qui génère certainement *« une plus grande prudence à deux »* (B2L).

5.2.2.2.5 AMÉLIORATION D'ECCOGEN-L

A. Stratégie évolutionnaire

Les binômes aimeraient pouvoir mieux influencer les générations successives selon des critères choisis (B1L, reformulé par un membre de l'équipe de développement : *« en pondérer l'importance »*). Ils voudrait pouvoir bloquer des points d'attraction, par exemple pour imposer une certaine surface sur un niveau (B1L et B2L : *« pouvoir contraindre à certains endroits »*).

Ils souhaiteraient également pouvoir hiérarchiser la valeur des performances afin que l'utilisateur ait connaissance des marges de manœuvre et des blocs à ne pas toucher (B2L : *« ça rend la perception sur le volume proposé plus facile et on a moins peur de voir tout s'effondrer »* ; B1L : *« l'important c'est pourquoi c'est performant plutôt que la masse en entier »*).

B. Outil de vérification ou de comparaison

Le besoin de contrôler les générations, mais aussi la créativité amène les binômes à penser un autre usage d'EcCoGen-L, celui de testeur énergétique de solutions développées par ailleurs, par exemple dans Sketchup (B1L). Ce qui pourrait également se faire par la mesure de l'écart entre une solution issue d'EcCoGen-L et ce qu'elle est devenue lorsqu'elle a été retravaillée par ailleurs, par exemple dans Sketchup (B1L : *« je mets dans EcCoGen et ça me donne les performances par rapport à ce que j'ai changé »* ; B2L : *« savoir si le compromis que tu as fait est acceptables »*). Ainsi, lorsque la conception est bien engagée, EcCoGen-L aurait une autre fonction, celle de comparer, de tester la solution en cours pour donner de l'information en termes de performances énergétiques

5.2.2.2.6 LIMITES DU SCÉNARIO

Les binômes ont évoqué les limites du scénario en évoquant essentiellement la durée, jugée trop courte pour vraiment tester plusieurs types de solutions (B1L et B2L), ce qui explique qu'ils aient assez peu fait tourner EcCoGen-L sur plusieurs générations. Cette durée trop faible ne permet pas de trop jouer avec EcCoGen-L, elle engage les utilisateurs à chercher l'efficacité (B1L et B2L). Le risque de mettre la solution en développement en cause est jugé trop important par B1L et B2L si EcCoGen-L avait été relancé trop tardivement ou alors que la solution était déjà bien engagée.

Par ailleurs, plus de temps permettrait aussi de mieux comprendre le fonctionnement d'EcCoGen-L entre les générations. Ce test sur un temps plus longpourrait avoir lieu dans un autre cadre pédagogique.

5.2.2.3 RETOURS DES BINÔMES LORS DU DEBRIEFING ECCOGEN-N

Les mêmes éléments sont discutés à propos du debriefing organisé dans le cadre de l'utilisation d'EcCoGen-N. Cependant, EcCoGen-N est traité dans son aspect intégré, liant l'outil évolutionnaire lui-même, mais aussi les deux environnements associés : Rhino et Grasshopper.

5.2.2.3.1 MOBILISATION D'ECCOGEN-N

A. Comme support de décision

Une caractéristique importante d'EcCoGen-N estqu'il permet de discriminer la performance des solutions élaborées par les binômes (B1N : *« finalement sans gradins et sans masque car la meilleure solution donnée par l'outil »* ; *« ceux sans [gradins] étaient mieux notés donc on a supprimé les gradins »*). Comme c'était le cas pour EcCoGen-L, EcCoGen-N produit un sentiment de confiance que l'on peut faire à l'outil (B2N : *« on peut tester quelque chose tout en étant sûr qu'on ne fait pas n'importe quoi »*). Notamment parce qu'il permet de vérifier rapidement si on est dans le bon chemin du point de vue énergétique.

La décision n'est cependant pas nécessairement pilotée par EcCoGen-N car B1N comme B2N ont été confrontés à une performance faible des gradins, ce qui a conduit à leur abandon pour B1N, mais à leur maintien pour B2N car *« ça a animé un peu la forme au lieu d'avoir quelque chose de lisse »*.

B. Comme support de créativité

L'intérêt d'EcCoGen-N en termes de créativité est qu'il permet d'utiliser beaucoup de fonctionnalités (B1N) ou encore que les utilisateurs sont confrontés à une accumulation d'individus qui suggère des formes (B1N). Ces formes sont plus ou moins originales, mais ne nécessitent pas d'être justifier (B2N : *« faire des formes qu'on aurait pas fait (...) finalement la forme elle a un peu été posée là par hasard, dans un projet on essaie de justifier pourquoi »*).

Ainsi, la solution développée apparaît créative (B1N : *« l'arc est plus original car parfois on se cale sur le terrain donc on fait plus d'angles droits »*), mais difficile à comparer avec un travail plus "habituel" ; (B2N : *« l'idée était intéressante mais limitée au niveau de la créativité car on n'avait que trois outils (...) mais ça peut créer des balcons intéressants et ça peut créer une dynamique dans la façade »*). EcCoGen-N assiste la démarche de création sans faire perdre aux utilisateurs le bénéfice du choix de leur forme initiale, mais sur d'autres critères (choix sur les gradins ou sur les ouvertures). Son apport en créativité est affirmé par B2N à propos de la tour qu'il a développé au-dessus du rez-de-chaussée, tour dont ni la position ni la forme n'étaient fixées. Le binôme note cependant qu'il a pu conserver le contrôle du projet.

Par ailleurs, EcCoGen-N peut soutenir diverses stratégies : répondre à des questions sur des choix de conception (B1N : *« est-ce que l'ouverture de l'arc va faire varier les aspects thermiques ou ce que les gradins vont faire varier »*) ou proposer des formes (B2N : *« on a essayé de dessiner plusieurs*

configurations »). Il est donc intéressant dans un cadre de formation car *« ça pousse à faire de l'architecture non standard et on a le droit en formation »* (B1N). Il permet également de travailler sur des aspects thermiques alors que d'ordinaire on privilégie l'esthétisme (B1N et B2N).

Enfin, comme c'est aussi le cas pour EcCoGen-L, la créativité est dans l'interprétation, y compris parfois dans l'imprévu ou la mauvaise lecture (cas de B2N et de la pointe de la tour) (B2N : *« il peut proposer des choses qu'on peut interpréter, mais c'est en voyant qu'on se dit "tiens voilà", en conception habituelle on peut voir des choses dans la rue qui vont servir à notre projet et je pense que [EcCoGen-N] peut servir à ça »*). EcCoGen-N est donc perçu par les binômes comme un outil favorisant la divergence.

C. Limites à la créativité

Une limité importante réside dans la maîtrise impérative de Grasshopper (B1N et B2N ; ECN1 : *« parce que moi j'aurais pas pu »*). Cela demande en outre un *« un effort de paramétrage »* (B1N) qui fait qu'EcCoGen-N lui-même *« n'a fait que bouger dans ces variables »*, même si cela correspond, selon les binômes, à la démarche dans un *« projet normal »*.

Dans l'environnement EcCoGen-N, les utilisateurs notent la difficulté à différencier les individus du point de vue formel (on retrouve cette même critique pour EcCoGen-L), ce qui ne permet pas toujours de créer des formes originales.

5.2.2.3.2 RETOURS ERGONOMIQUES SUR ECCOGEN-N

Le fait que les binômes aient bien plus mobilisés les environnements Rhino et Grasshopper que l'environnement EcCoGen-N lui-même ne permet pas d'en faire une évaluation très poussée du point de vue ergonomique.

A. Lecture / interprétation des individus

La lecture des individus est *« compliquée »* (B2N). Ce à quoi s'ajoute le fait que les utilisateurs ne peuvent pas s'orienter par rapport au site (B2N : *« la hauteur on ne voit pas trop sans l'environnement »* ; B1N : *« une vue sud aurait permis de mieux appréhender la courbe de la façade »*).

Par ailleurs, les binômes évoquent leur mauvaise compréhension des interactions entre les paramètres, notamment parce que les ombres portées étaient manquantes alors qu'elles sont importantes.

B. Interface

Du point de vue de l'interface elle-même, les binômes notent le manque de vues dans les résultats.

5.2.2.3.3 AMÉLIORATION D'ECCOGEN-N / RHINO-GRASSHOPPER

A. Stratégie évolutionnaire

Selon B1N et B2N, il conviendrait d'indiquer les ombres portées de l'environnement sur l'individu et celui de l'individu sur l'environnement. Une amélioration pourrait également consister dans le fait de donner la possibilité de fusionner des individus ayant le même centre de gravité pour en créer un seul (B1N).

EcCoGen-N doit permettre de vérifier que les utilisateurs ne s'éloignent pas de la performance énergétique quand ils développent le projet par ailleurs, avec d'autres environnements. Il faudrait aussi pouvoir intervenir au niveau des étages pour maîtriser mieux l'évolution des individus.

B. Outil de vérification ou de comparaison

Il serait intéressant d'améliorer l'affichage des individus afin de mieux voir les particularités des individus

les uns par rapport aux autres (B2N). Le même binôme indique qu'une information sur les solutions les moins bonnes pourrait être intéressante car cela donnerait une information supplémentaire. En effet, les neuf individus proposés se ressemblent. Si les moins bonnes solutions étaient proposées, cela permettrait peut-être de mieux comprendre celles qui sont performantes.

5.2.2.3.4 LIMITES DU SCÉNARIO

Comme c'est le cas pour EcCoGen-L, la durée de l'exercice est jugée insuffisante par B1N et B2N. Notamment parce qu'elle ne permet pas de tout tester (B2N : *« on a juste eu le temps d'essayer les gradins avec ombrage sur les vitres »*). La qualité perçue du projet n'apparaît pas très élevée aux binômes, mais sans que l'outil soit mis en cause. C'est plutôt que, dans le temps imparti, ils n'ont pas pu avoir un retour sur l'impact des choix réalisés. La durée du projet a fait qu'ils ont définit une forme puis l'ont conservée.

5.2.2.4 SYNTHÈSE DES DEBRIEFINGS

En synthèse de ces debriefings, nous notons les éléments suivants, communs aux deux situations observées.

Importance de la forme dans la création, plus importante que les performances énergétiques, ce qui apparaît à plusieurs reprises dans les deux cas.

Importance pour les binômes de rester les créateurs, EcCoGen n'étant qu'un support de cette créativité et non pas créatif en lui-même.

Les deux environnements suscitent une certaine confiance, notamment dans le fait qu'ils permettent (ou devraient permettre) de vérifier des projets issus d'EcCoGen mais qui ont été développés par ailleurs, avec d'autres outils.

L'homogénéité perçue des neuf individus proposés lors d'une génération ne permet pas de bien les différencier en termes de performances ni de formes.

EcCoGen-N apparaît plus technique qu'EcCoGen-L du fait de la maîtrise nécessaire de l'outil Grasshopper.

5.2.3 ECCOGEN-L DANS LE PROCESSUS CRÉATIF

Nous allons maintenant passer à l'analyse proprement de l'utilisation des environnements EcCoGen. Nous passerons en revue les questions liées à l'ergonomie puis observerons l'activité des sujets. Pour ce faire, nous commencerons par EcCoGen-L et poursuivrons avec EcCoGen-N avant de faire une synthèse de ces observations.

5.2.3.1 L'INTERFACE ECCOGEN-L ET SON UTILISATION

5.2.3.1.1 ÉLÉMENTS D'INTERFACE D'ECCOGEN-L

Les utilisateurs sont confrontés à deux types d'interfaces sur EcCoGen-L, qui correspondent en fait à trois situations différentes.

– **L'interface principale** (Figure 39) permet de paramétrer notamment le nombre de niveaux du bâtiment en création ou encore le nombre de générations produites à chaque étape, sur le bas de l'interface. On y voit également la légende des paramètres utilisés en haut à gauche. Ceux qui sont utilisés dans ce prototype sont les paramètres de compacité (rouge), d'énergie (vert) et d'ombres portées (bleu). L'espace principal est celui des neuf meilleurs individus générés lors d'une étape (*step*). Ils pivotent tous en même temps et les trois

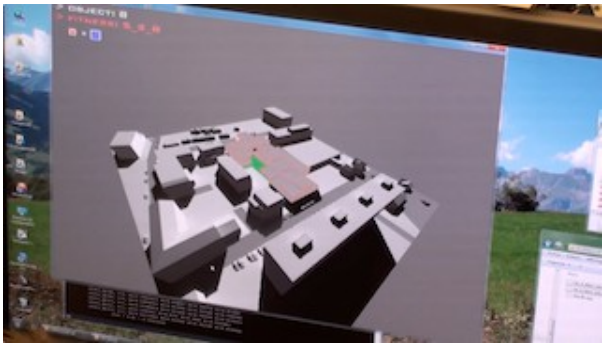
performances citées avant apparaissent dans chacun des cadres.

Figure 57. Vue des 9 individus (V9).

Cette vue doit donc permettre aux utilisateurs de comparer les neuf individus, tant du point de vue de la forme que de celui des performances. Les deux colonnes de droite (12 cases) permettent de mettre de côté des "coups de cœur" afin de les conserver avant de relancer un calcul. La forme de ces coups de cœur n'évolue donc pas au cours des étapes successives et leurs performances non plus. Enfin, il est possible de sélectionner un ou plusieurs individus avant de lancer un calcul (le cadre dans lequel il apparaît est surligné de rouge), que cet individu soit l'un des neuf de la fenêtre principale ou l'un des coups de cœur.

– **La vue en 3D** (Figure 40) permet d'observer l'un des individus plus particulièrement, qu'il s'agisse d'un des neufs individus de la génération en cours ou de l'un des coups de cœurs. Dans ce mode de visualisation, les utilisateurs peuvent passer de l'un à l'autre individu à l'aide des touches directionnelles du clavier. Ils n'ont donc pas besoin de repasser par l'interface principale pour sélectionner un nouvel individu en mode 3D. Dans ce mode, le numéro de l'individu apparaît en haut à gauche de l'écran, ainsi que l'indication de ses performances.

On note immédiatement que les valeurs apparaissent dans l'ordre des carrés de couleurs, eux-mêmes proportionnels, ce qui facilite la lecture. Cependant, ces carrés de couleurs ne sont pas légendés, de sorte qu'il est nécessaire d'avoir mémorisé la signification des couleurs pour pouvoir les lire. Ceci est une erreur ergonomique manifeste. Enfin, dans ce mode, les utilisateurs peuvent orienter l'individu dans les trois dimensions, ainsi que les deux captures d'écran de la Figure 40 le montrent.



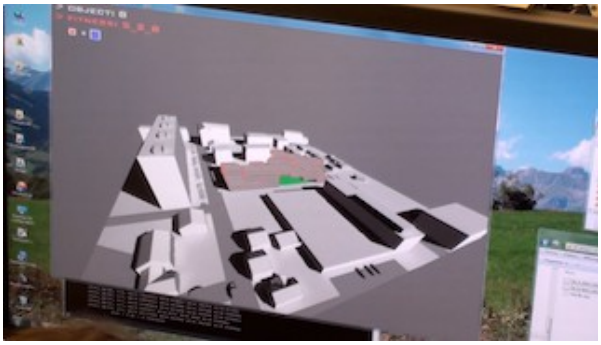


Figure 58. Vue 3D d'un individu sélectionné, selon deux angles (V3D).

– **Le zoom dans la vue 3D** (3DZ, Figure 41) permet, alors la molette de la souris, de s'approcher de l'individu afin de mieux l'observer. Là encore, les utilisateurs peuvent naviguer d'un individu à l'autre par les flèches directionnelles en conservant la même orientation du zoom. On remarque que le numéro de l'individu ainsi que l'information sur ses performances ne figure plus dans cette fenêtre, le zoom les en a "fait sortir". C'est là aussi une erreur ergonomique car les utilisateurs perdent très vite le fil des numéros au gré de leur navigation. Ils n'ont en outre plus aucune indication de la valeur écologique des individus qu'ils prospectent sous ce mode alors même que c'est l'un des enjeux de cet outil.

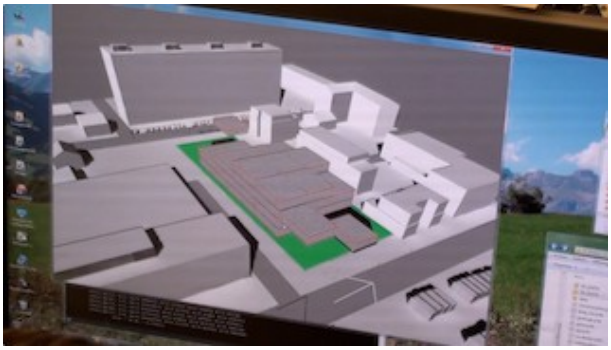


Figure 59. Vue 3D en zoom d'un individu sélectionné (V3DZ).

Enfin, le niveau de zoom est conservé lorsque les utilisateurs retournent dans la fenêtre principale (V9). Ainsi, s'ils n'ont pas zoomé (état V3D) lorsqu'ils retournent en V9, ils retrouveront une vue 3D de base. En revanche, s'ils ont quitté la vue en mode zoom (3DZ), alors ils reviendront dans le même état de zoom (et l'orientation définie) lorsqu'ils sélectionneront un individu depuis V9. Ils y accéderont donc sans les indications de numéro d'individu ni de performances.

5.2.3.1.2 COMMANDES PRINCIPALES DE B1L ET B2L SUR ECCOGEN-L (V9)

Les principales commandes réalisées sur l'interface principale d'EcCoGen-L (V9) par chacun des binômes apparaissent dans les deux tableaux ci-dessous (Tableau 1 et Tableau 2). On y voit que B1L a fait varier les niveaux (7 puis 4 étages) ainsi que le pas générations lors d'un calcul (1 puis 3 puis 10) alors que B2L n'a fait varier que les niveaux (7, 5, 3 puis 4), conservant le même pas pour tous les calculs (5). Autre observation, B1L réinitialise le système une seule fois lorsqu'il passe de 7 à 4 niveaux, faisant 3 calculs dans la première configuration et 5 dans la seconde. B2L, lui, réinitialise plus souvent le système, réalisant 5 configurations plus ou moins développées.

Binôme 1 - Lyon

Temps	N° Gén.	Action	Étages	Générations	Sélection	Coup coeur
0:01:31	11	lance le calcul	7	1		
0:02:00		fin du calcul				
0:06:20		cp de coeur				O2 => O11
0:06:27	12	lance le calcul	7	1		
0:07:02		fin du calcul				
0:09:52	13	lance le calcul	7	3		
0:11:35		fin du calcul				
0:14:44	14	lance le calcul	7	3		
0:16:27		fin du calcul				
0:17:54		initialise				
0:18:01	21	lance le calcul	4	3		
0:18:27		fin du calcul				
0:25:50	22	lance le calcul	4	10		
0:30:15		fin du calcul				
0:41:06		cp de coeur				O7 => O11
0:41:27	23	lance le calcul	4	10		
0:45:40		fin du calcul				
0:51:58		cp de coeur				O5 => O13
0:52:05	24	lance le calcul	4	10	O13	
0:56:01		fin du calcul				
1:01:39		cp de coeur				O9 => O15
1:04:11		cp de coeur				O3 => O17
1:05:48		sauvegarde			O3	
1:06:07		sauvegarde			O9	
1:09:39		sauvegarde			O11	
1:19:55	25	lance le calcul	4	5	O11, O15, O17	
1:21:43		fin du calcul				
3:09:00		fin de séance				

Tableau 1. Commandes de B1L sur l'interface V9.

Binôme 2 - Lyon

Temps	N° Gén.	Action	Étages	Générations	Sélection	Coup coeur
0:00:43	11	lance le calcul	7	5		
0:03:24		fin du calcul				
0:07:50		initialise				
0:07:59	21	lance le calcul	5	5		
0:08:27		fin du calcul				
0:08:44	22	lance le calcul	5	5		
0:11:07		fin du calcul				
0:20:15	23	lance le calcul	5	5	O1, O5, O6	
0:22:39		fin du calcul				
0:27:19	24	lance le calcul	5	5	O3, O9	
0:31:48		fin du calcul				
0:33:15		cp de coeur				O6 => O14
0:38:35	25	lance le calcul	5	5	O1, O3, O14	
0:40:41		fin du calcul				
0:44:32	26	lance le calcul	5	5	O3, O14	
0:46:37		fin du calcul				
0:53:00		cp de coeur				O4 => O16
0:53:11	27	lance le calcul	5	5		
0:55:07		fin du calcul				
0:59:00		sauvegarde			O14, O16	
1:01:20		initialise				
1:01:33	31	lance le calcul	3	5		
1:01:57		fin du calcul				
1:02:33		initialise				
1:02:35	41	lance le calcul	3	5		
1:02:59		fin du calcul				
1:04:43	42	lance le calcul	3	5	O4, O5	
1:06:32		fin du calcul				
1:08:10		initialise				
1:08:13	51	lance le calcul	4	5		
1:08:40		fin du calcul				
1:11:29		cp de coeur				O8 => O18
1:11:39	52	lance le calcul	4	5	O8	
1:13:54		fin du calcul				
1:16:25		sauvegarde			O7	
1:18:02	53	lance le calcul	4	5		
1:20:10		fin du calcul				
1:20:56		sauvegarde			O18	
2:03:43	54	lance le calcul	4	5		
2:06:47		fin du calcul				
3:38:00		fin de séance				

Tableau 2. Commandes de B2L sur l'interface V9.

Les coups de cœur sont assez distribués dans les deux cas, certains étant assez précoces, notamment pour B1L, mais disparaissant car ils ne sont pas sauvegardés lors de la réinitialisation du système.

5.2.3.2 DIFFICULTÉS LIÉES AUX INTERFACES

Les défauts ergonomiques majeurs de ces fenêtres ont été énoncés dans la présentation des interfaces.

Référence des performances non explicite en V3D.

Disparition du numéro de l'objet (individu) et de ces performances en V3DZ.

Ces défauts sont confirmés par les individus explicitement lors du debriefing (point 8.2), mais surtout par leurs actions en situation de conception. C'est ainsi que l'on observe que les utilisateurs ont, dans chacune des situations, dû faire une fois un retour en V9 depuis la vue V3D pour donner du sens aux couleurs des carrés de performance qui apparaissent dans cette dernière vue. Mais le défaut le plus manifeste est celui qui concerne la disparition des numéros et des indications de performance en V3RZ. Ainsi, on observe que les deux binômes (B1L et B2L) s'interrogent régulièrement sur l'objet qu'ils sont en train d'évaluer lorsqu'ils sont en V3DZ. L'opération, acquise en situation pour les deux binômes, consiste à dézoomer soit pour lire le numéro, soit pour prendre connaissance des performances, puis, le plus souvent rezoomer pour reprendre le cours de l'observation en cours. On observe ces opérations de "dézoome" pour prendre de l'information :

9 fois pour B1L ;

18 fois pour B2L.

Une explication de cette différence entre B1L et B2L peut se trouver dans l'observation suivante. Les binômes B1L et B2L n'utilisent pas de la même façon les différentes vues (Figure 42 et Figure 43). Ainsi, B2L passe proportionnellement plus de temps en V3DZ, là où les informations sont manquantes que ne le fait B1L. De sorte que B1L a plus souvent sous les yeux les numéros des individus ainsi que les valeurs de performances. Pour obtenir ces informations, B2L est en revanche contraint de dézoomer pour les obtenir. Cette activité de "dézomme-rezomme" apparaît d'ailleurs dans le temps moyen, assez court (11 sec.), que B2L consacre à V3D, expliqué par le fait que le passage dans cette vue n'est très souvent que d'une à deux secondes, le temps de dézoomer pour prendre de l'information.

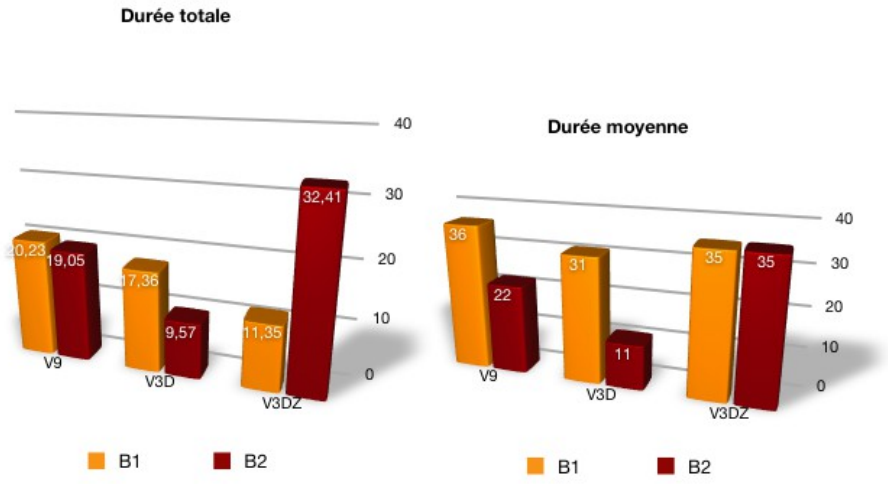


Figure 60. Temps total et moyen dans chacune des vues pour B1 et B2.

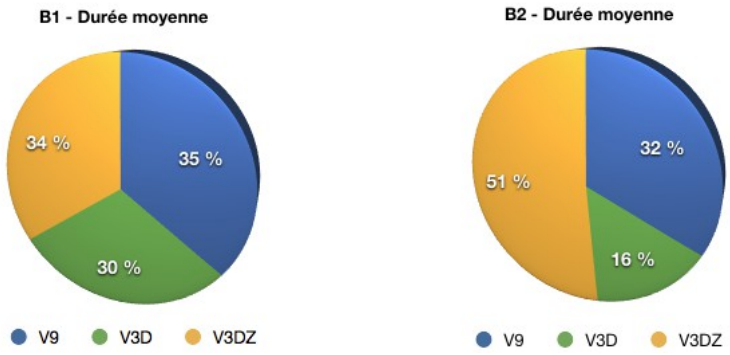


Figure 61. Proportion des temps dans chacune des vues pour B1L et B2L.

Pour caractériser ces difficultés, prenons comme exemple une séquence qui a lieu au sein de B2L (23, Tableau 2) durant une minute trente (0:24:50 à 0:26:00). EC2L et SK2L sont en train de visualiser un objet particulier, l'objet 3 (O3), dans la vue V3DZ, donc sans les indications de numéro ni de performances de cet objet. Une évaluation positive est portée qui amène à la proposition de relancer un calcul sur la base de O3.

SK2L : c'est pas mal ça

EC2L : hum on peut relancer à partir de ça (retourne dans V9)

EC2L : on en relance 5 à partir de ça ? c'est laquelle ?

(ECL2 ne relance pas l'objet 3 mais l'objet 5 car le pointeur est situé sur O5 et non sur O3 quand EC2L

appuie sur la touche espace qui permet de basculer en vue V3D)

(Comme EcCoGen-L était en vue V3DZ lorsque EC2L a basculé en vue V9, la vue qui s'affiche est de nouveau en V3DZ, ne laissant pas apparaître le numéro de l'objet sélectionné)

(EC2L dézoome et fait apparaître le numéro de l'objet)

EC2L : la 5

(EC2L bascule de nouveau en vue V9)

SK2L : c'était celle-là qu'on vient de regarder ?

EC2L : je crois oui

(passe en V3D, zoome en V3DZ et explore O5)

SK2L : non c'était pas ça

EC2L : non c'était pas ça

SK2L : non elle était bien plus haute

(EC2L fait tourner les individus en V3DZ jusqu'à O9 dont le numéro n'est donc pas affiché)

EC2L : c'est ça ?

SK2 : euh non

(EC2L, toujours en V3DZ affiche O1)

ECL2 : c'était celle-là ?

SK2 : attends voir

(SK2 saisit la souris EcCoGen-L, explore O1, toujours en V3DZ donc toujours sans le numéro affiché, puis passe à O2 et O3)

SK2 : c'est celle-là je crois

(SK2 dézoome et affiche le numéro d'O3)

SK2 : ouais 3

EC2L : hum

SL2L : ce qui est pas mal c'est ce bloc un peu plus haut

EC2L : ouais aussi ouais qui vient refermer

Au cours de cet extrait, il est manifeste que l'absence d'informations sur les numéros nuit à l'action des utilisateurs. Non seulement, cela les oblige à des actions régulières de dézomme pour identifier l'objet en cours, ce qui a été identifié par B1L et B2L lors du debriefing, mais en outre cela les oblige à mémoriser ces objets. Surtout cela peut engendrer des erreurs de sélection car ici, l'inattention d'EC2L, lorsqu'il repasse en V3DZ après s'être accordé avec SK2L que O3 était un objet intéressant sur lequel ils pouvaient fonder un nouveau calcul, aurait pu amener le binôme à travailler sur la base d'O5 au lieu d'O3. Il leur faut donc

ensuite retrouver le bon objet, en mobilisant leur mémoire, pour reprendre le cours de l'action. Ce qui est fait environ une minute plus tard puisqu'ils sélectionnent O3 (ainsi que O9) pour lancer un nouveau calcul.

Ce qui est vrai pour l'absence d'indication du numéro des objets en V3DZ l'est aussi pour les performances et cela peut expliquer des stratégies différences en termes de formes et de performances au sein de chacun des binômes. Nous poursuivons cette réflexion au point suivant.

5.2.3.3 FORMES ET PERFORMANCES

Dans cette partie, nous allons voir comment les binômes construisent des hiérarchies entre formes et performances ainsi que des relations entre ces deux dimensions.

5.2.3.3.1 PRIMAT DE LA FORME SUR LES PERFORMANCES ÉNERGÉTIQUES

De façon générale, B1L et B2L privilégient la forme aux valeurs de performances, sans toutefois sous-estimer ces dernières. Durant toute la première partie, plus directement créative, au cours de laquelle les binômes mobilisent EcCoGen-L, on observe respectivement les répartitions suivantes pour B1L et B2L (Tableau 3). Les interventions recensées concernent des expressions ou échanges qui sont soit orientés uniquement sur la forme des objets, soit uniquement sur la performance, soit sur un lien entre les deux, le sens se faisant toujours de la forme vers la performance (ex : SK1L observant un objet : *« ça peut être pas mal de faire une petite place là et regarde la performance »* ou cet échange entre EC2L et SK2L : *«* EC2L *– ce qui est pas mal sur celle-là (O4) c'est que là t'as une façade un peu lisse ;* SK2L *– fais voir en termes de performance du coup ce que ça donne »*).

Tableau 3. Répartition des préférences en termes de formes et de performances.

Préférences exprimées dans le discours	B1L	B2L
Exclusivement orientées sur la forme des individus	28	43
Échanges sur la forme suivis d'échanges sur la performance	8	8
Exclusivement orientées sur la performance	13	5

Ce qui ressort de ce premier regard, c'est que les binômes tendent à produire d'abord une recherche en terme de forme, y compris de façon assez subjective (j'aime / j'aime pas), puis qu'ils "vérifient", lorsque les formes observées leur semblent intéressantes qu'elles sont suffisamment performantes ou sont acceptables de ce point de vue. La performance serait alors un critère de décision permettant de conserver ou non la forme en question. La réalité est en fait plus complexe.

Si l'on prend le cas de B1L comme exemple, on note qu'il construit une relation entre forme et performance qui guide sa conception. Cette relation s'appuie sur :

l'identification d'une contrainte forte liée au positionnement du supermarché en rez-de-chaussée ;

l'identification de formes qui vont structurer leurs recherches, notamment l'existence d'un « trou » ;

une compréhension d'un lien entre forme et performance ;

une hiérarchisation des trois critères de performances que sont l'énergie, les ombres portées et la compacité ;

une hiérarchisation entre les contraintes d'EcCoGen-L (ces trois critères de performances) et les contraintes données par le programme.

Nous analysons ces points en travaillant la construction des relations entre forme et performance.

5.2.3.3.2 RELATIONS ENTRE FORMES ET PERFORMANCES

L'analyse du processus de choix des formes qui seront exportées dans Sketchup pour développer la solution finalement présentée (processus qui dure une heure trente environ) fait ressortir quelques points clés.

A. Identification d'une contrainte liée au programme

La contrainte liée à l'emplacement du supermarché pose immédiatement un obstacle à la recherche de solutions qui est faite initialement avec 7 étages car, du fait de la superficie de l'ensemble du projet, trop peu d'éléments sont au sol et beaucoup d'autres « volent », c'est-à-dire sont isolés, en l'air. Cela est également vrai pour B2L qui rencontre le même obstacle. Il faut absolument trouver des solutions ayant suffisamment d'éléments au sol. Pour cela, il faut diminuer le nombre d'étages. Pour B1L comme pour B2L, le bon compromis sera de travailler avec 4 niveaux, ce qui laisse suffisamment d'éléments au sol tout en permettant de dégager des espaces de circulation et, en termes de créativité, de pouvoir observer des formes à traduire en termes d'architectures.

Nous avons donc là l'identification d'une contrainte forte qui apparaît dans la conception de B1L comme de B2L : placer le supermarché. C'est une contrainte liée au programme lui-même. Certes, elle n'est pas inventée par B1L, ni par B2L, mais, parmi toutes les informations figurant dans le programme, celle-ci devient, par le jeu de l'interaction au sein du binôme et par sa confrontation aux solutions générées par EcCoGen-L, un élément fortement structurant du programme. Cette contrainte est suffisamment forte pour B1L qu'une génération à sept niveaux, la troisième, est très peu étudiée (elle dure a peine trois minutes) sur ce motif (« les grandes masses sont en hauteur ») et aboutit sur le constat qu'il faut réduire le nombre d'étages qui sont ramenés à quatre.

B. Lecture des individus et construction d'une "connaissance" liant forme et performance

Les formes perçues sont importantes dans le travail de B1L. Dès que le niveau d'étages est ramené à quatre, EC1L et SK1L y perçoivent des formes architecturales. Ainsi, non seulement « c'est beaucoup mieux » avec quatre niveaux, mais en outre EC1L voit « un chemin sinueux » dans l'une des formes, ce que SK1L reprend en parlant de « vague ». Ce sont bien des formes architecturales, créatives, qui sont évoquées puisque les individus sont composés de blocs rectangulaires de tailles identiques. Cette perception de formes architecturales permet à B1L de construire une connaissance liant formes perçues et performances, notamment en termes d'ombres projetées. Si certaines formes sont performantes du point de vue des ombres projetées (nous le notons Po+ pour Performance des ombres positive), c'est parce que les blocs ont une certaine forme au sud. Ce même travail est réalisé au sein de B2L qui, lui aussi, identifie des formes dans les formes l'amenant à *« décomposer »* un individu de manière à *« lire ça comme un élément »* (SK2L).

Cette connaissance est d'ailleurs donnée par SK1L lors du debriefing collectif. Qu'elle soit vraie ou fausse n'est pas la question. Le fait est qu'elle est stabilisée au sein du binôme, mobilisée à trois reprises et qu'elle agit comme un élément soutenant le processus créatif.

Ailleurs, ce sont des « percées », des « trous » qui sont identifiés et qui deviennent des éléments recherchés dans les générations suivantes. Pris ensemble, ces deux éléments morphologiques, la vague et le trou, contribuent à construire deux choses.

Un principe selon lequel certaines parties des individus sont particulièrement performantes sur certains critères. C'est le cas de la vague qui est performante pour les ombres portées. Cela est aussi repris par SK1L lors du debriefing. A plusieurs reprises, il souligne qu'il souhaiterait avoir une information plus particulière sur des éléments d'un individu afin de savoir ce qui explique en la performance globale.

Une hiérarchie des critères de performance. En effet la vague est associée à une bonne performance du point

de vue des ombres (Po+) tandis que, sur un autre objet, le trou est associé à une compacité moindre (Pc–). Or l'un et l'autre objet sont désirables pour B1. Nous développons cela dans un troisième point.

C. Hiérarchie des critères de performance

Très rapidement (6ème minute), SK1L établit une hiérarchie dans les critères de performances proposés : *« le plus important c'est energy et shadow casting »* et *« compacity c'est le dernier »*. Mais cette affirmation n'est pas étayé, simplement validée par un « oui » de EC1L. Par la suite, cette hiérarchie réapparaît et est construite de façon plus argumentée.

Nous l'avons vu au point précédent, le fait de privilégier deux formes dont l'une est performante sur un critère hiérarchiquement supérieur pour B1L (Po) alors que l'autre ne l'est pas sur le critère hiérarchiquement inférieur (Pc) valide cette hiérarchie ou, du moins, ne la met pas en cause. Le trou n'est certes pas bon du point de vue de la compacité, mais comme ce critère est moins important, il ne peut, à lui seul, invalider le trou comme forme désirable pour B1L.

Cette hiérarchie est confortée plus loin, lors de l'examen de la quatrième génération de la série sur quatre niveaux (56ème minute), mais argumentée cette fois. La compacité n'est pas importante (SK1L : *« en fait la compacité on s'en fout »*) parce que le programme commande de développer des bureaux qui soient attractifs, avec des terrasses. Autrement dit, la compacité n'est pas très compatible avec une certaine recherche esthétique, voire elle va à l'encontre d'une certaine créativité. Nous avons deux nouvelles connaissances construites ou validées ici.

Les critères de performances peuvent être hiérarchisés, la compacité étant non seulement le critère le moins important

Certaines fonctions indiquées dans le programme peuvent être supérieures en termes de contraintes aux critères de performance énergétique (dans cet exemple la compacité), alors même que le travail conduit est axé sur ces aspects énergétiques.

D. EcCoGen-L comme ressource et non comme programme

Sur la base de ces observations concernant la hiérarchie des critères de performance et leurs liens éventuels de subordination à des aspects esthétiques, créatifs, définis dans le programme de travail, nous faisons une hypothèse expliquant pourquoi les deux groupes se sont fixés sur quatre niveaux (*cf.* Tableau 1 et Tableau 2).

Dans le cas de B1L, le choix de 4 niveaux (0:18:01) suit immédiatement la série de quatre générations sur 7 niveaux. Nous avons vu qu'il était insatisfaisant alors que 4 niveaux est immédiatement reconnus comme un choix meilleur. Dans le cas de B2L, la situation est différente. Après avoir lancé un calcul sur 7 niveaux également (une seule génération), B2L passe sur cinq niveaux sur un assez long temps de conception (0:07:59 à 1:01:11) durant lequel il va extraire des individus pour les travailler dans Sketchup, puis passe à 3 niveaux parce que, malgré tout, à 5 niveaux *« ça vole quand même beaucoup »* (1:01:11 à 1:08:03). Mais à trois niveaux, les individus sont *« trop plats »*, ce qui amène B2L à travailler sur 4 niveaux pour la fin de son exploitation d'EcCoGen-L dans la partie créative. Avec cette sentence de SK2L : *« je trouve que les solutions sur quatre sont mieux que: »* (1:20:56).

L'hypothèse que nous faisons est donc que les générations à quatre niveaux sont celles qui permettent à B1L comme à B2L de travailler en créativité de façon satisfaisante. Elles sont un bon compromis entre une contrainte impérative (le supermarché est au rez-de-chaussée, ce qui impose une certaine superficie au sol) et des volumes suffisamment dispersés en élévation pour pouvoir lire des formes : une « vague », un « chemin sinueux », un « fil qui tourne ». Formes qui ne sont pas celles explicites fournies par EcCoGen-L, mais que les utilisateurs peuvent lire, interpréter, faisant par là œuvre de création. Ce niveau d'élévation est donc celui qui relie les contraintes programmatiques, celles des performances énergétiques, mais aussi, et peut-être surtout, le besoin créatif des élèves architectes.

5.2.3.3.3 CONSTRUCTION D'UN MODÈLE MORPHOLOGIQUE PERFORMANT

Si l'on poursuit l'exemple de B1L, on comprend comment le binôme construit un modèle d'objet, alliant forme et performances. Durant la phase 22 (Tableau 1), une opposition surgit entre EC1L et SK1L.

0:32:23

(EC1L explore O4 en VP3D)

EC1L : ce qui m'embête tu vois c'est que c'est compact au centre

SK1L : de toute façon on a pas besoin de respecter ce coin parce que si ça c'est déjà performant ici ça va être performant donc le trou ici on peut le mettre ici

EC1L : oui mais après tune peux plus t'appuyer sur le logiciel en disant que c'est une solution performante si tu le modifies

SK1L : forcément on va modifier

EC1L : oui forcément

(EC1L affiche O3 en V3D)

SK1L : et ça c'est pas mal

Dans ce court extrait, les deux positions par rapport à la fonction d'EcCoGen-L dans le processus créatif sont affirmées.

– Selon EC1L, EcCoGen-L doit assurer la validité des solutions en termes de performances. Déformer l'objet fournit par EcCoGen-L empêche d'en conserver les propriétés énergétiques.

– Selon SK1L, EcCoGen-L fournit des indices sur la performance énergétique des solutions, indices qu'il faut identifier afin de les extraire pour construire une solution satisfaisante. Il convient donc de s'affranchir d'EcCoGen-L.

Autrement dit, ce sont deux conceptions qui s'opposent. Selon EC1L, EcCoGen-L est un programme à suivre pour la conception d'une solution. Selon SK1L, EcCoGen-L est une ressource pour le développement de la solution. Ces deux positions sont en confrontation et c'est SK1L qui l'emporte grâce au raisonnement syllogistique suivant.

Si EcCoGen-L est un programme, alors il ne faut pas modifier l'objet sélectionné

Or l'objet sélectionné sera nécessairement modifié

Donc EcCoGen-L n'est pas un programme

La position d'EC1L, EcCoGen-L est un programme, n'est donc pas valide, ce qu'EC1L accepte. Des deux propositions ne reste donc que celle de SK1L qui, en conséquence, devient valide jusqu'à ce que, éventuellement, mais ce ne sera pas le cas, une autre proposition soit discutée : EcCoGen-L est une ressource. Et si EcCoGen-L est une ressource, alors il convient d'identifier les éléments-ressources.

Dans les minutes qui suivent, toujours dans la phase 22, B1L élabore un modèle qui lui permet de structurer sa recherche formelle puis, plus tard, de développer sa solution. EC1L explore l'objet O7 (Figure 44. Objet O7 évalué par EC1L.Figure 44) en vue V3DZ, objet qu'elle évalue ainsi (0:37:48) :

EC1L : celui-là il est pas mal mais t'as pas assez de trucs au sol

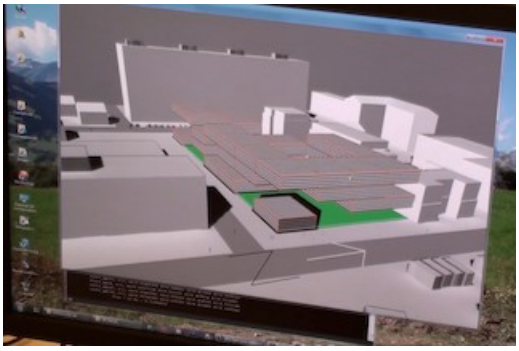


Figure 62. Objet O7 évalué par EC1L.

La contrainte fondamentale d'empreinte au sol n'est donc pas satisfaite. Cependant EC1l poursuit en interprétant cette forme au moyen d'un dessin (D4, Figure 45).

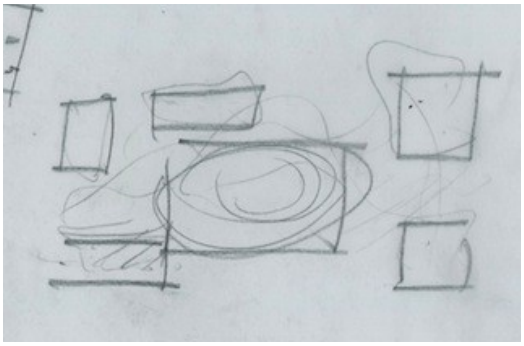


Figure 63. Extrait du calque D4.

0:37:51

EC1L : à la limite si tes commerces ils sont éclatés que t'aies par exemple un truc central au milieu de ta parcelle

(EC1L dessine sur D4)

EC1L : donc du coup ça te fait toute une promenade couverte entre les magasins ça peut être pas mal ça mais du coup il faut trouver un:

SK1L : et ici la coupe ça peut être ça (...) avec la terrasse privée

EC1L : pour les bureaux oui

SK1L : ah c'est cool

EC1L : ça peut être vraiment cool ouais

SK1L : du coup c'était quel objet qui t'a inspiré ?

EC1L : c'est ça, c'est le 7

SK1L : alors garde-le

EC1L : mais euh il est pas optimum quoi il est pas: c'est plus ou moins l'idée quoi

SK1L : et il y a l'autre truc qui est avec une morphologie similaire avec la même performance

EC1L : ah parce que la 7 du coup la performance

(EC1L dézoome en V3D)

SK1L : c'est pas terrible

EC1L : c'est pas super

SK1L : c'est quoi le vert déjà ?

EC1L : euh énergie, faut que je sorte de là

(EC1 repasse en vue V9)

EC1L : si c'est l'énergie

SK1L : en fait c'est ça que si on fait le trou ici *(dessine sur D4)* c'est le sud et si on fait le trou si on fait la façade sur ce côté on gagne le soleil toujours si on fait la coupe comme ça c'est bon pour l'énergie si on fait la coupe comme ça c'est bon pour les ombres

EC1L : hum

SK1L : du coup si on fait ça c'est bon pour l'énergie et bon pour les ombres

EC1L : ouais

SK1L : du coup on cherche la solution à peu près

EC1L : ouais, du coup c'est le 7 que j'avais vu peut-être le 9

(....)

SK1L : on le garde le 7 et on essaie de lancer encore deux fois

(EC1 déplace O7 en coup de cœur O11 et lance le calcul)

On sait que B1L privilégie une forme avec un trou, pour faire un atrium. Cette forme privilégiée est ici validée et, donc renforcée. L'objet O7 pourrait satisfaire cette recherche (O7F+), mais il n'est pas performant sur la contrainte principale (O7C–), l'empreinte au sol. L'obstacle a soulevé est de conserver la forme tout en la rendant compatible avec la contrainte au sol. C'est ce que fait EC1L, qui conçoit sur papier une solution qui permet de conserver O7F+ et de le rendre O7C+ : *diviser l'empreinte au sol*. Un caractère non discuté de la contrainte saute : il n'est pas nécessaire que la parcelle correspondant au supermarché soit d'un seul tenant.

L'objet O7 est maintenant caractérisé de la façon suivante : O7F+C+. Et c'est précisément grâce à l'aspect F+ qu'il est possible de développer C+. En effet, si l'empreinte au sol est faible, c'est qu'elle permet de développer des services en hauteur. C'est le sens des interventions de SK1L qui évoque les bureaux et les terrasses sur les niveaux supérieurs. Or ce développement fait justement partie du programme de travail. L'objet 7 est donc, à la suite de cet échange, réellement O7F+C+, ce que manifeste SK1L : *« ah c'est cool »*, confirmé par EC1L.

La forme étant satisfaisante, il faut, comme nous l'avons identifié plus haut, vérifier la performance. D'autant plus que O7 est en vue V3DZ, donc que ses performances ne sont pas visibles à l'écran. Le dézoome de EC1L indique des performances qui apparaissent faibles au binôme. L'objet O7 est F+C+, mais P–. Plus exactement, comme le montre la Figure 46, il est plutôt bon sur le critère d'énergie (9, en vert), mais

plus faible sur la compacité (4, en rouge) et sur les ombres portées (5, en bleu). L'objet O7 est donc, du point de vue des performances, Pc–Pe+Po–.

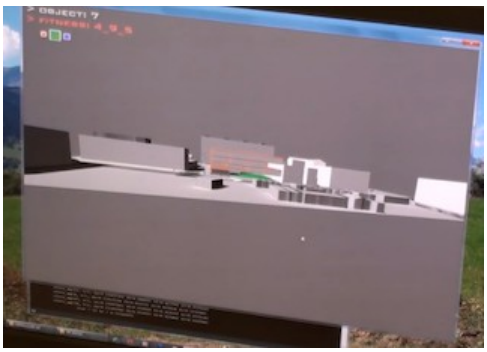


Figure 64. Objet 7 en vue V3D.

Là encore l'obstacle va être levé et O7 sera validé comme objet modèle. C'est cette fois SK1L qui lève l'obstacle en déplaçant le trou. En faisant cela, il recourt à sa définition d'EcCoGen-L comme ressource puisqu'il utilise les propriétés d'un élément de la forme pour jouer avec, le déplacer, et continuer de bénéficier de ses performances dans un objet proche de l'original, mais transformé. Puisque la compacité n'est pas un critère important, nous l'avons vu plus haut, en tout cas qu'il est moins important que les deux autres critères d'énergie et de performances et moins important que les contraintes esthétiques, alors il s'agit de trouver une forme qui soit Pe+Po+. C'est ce que fait SK1L en jouant sur le positionnement du trou et sur l'orientation des façades qui peuvent être soit Pe+, soit Po+, soit Pe+Po+ grâce au positionnement du trou est peut allier les deux qualités (Figure 47).

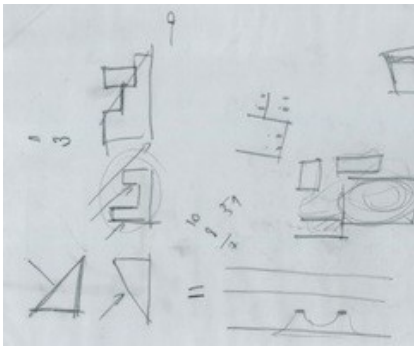


Figure 65. Positionnement du trou, captation du soleil et projection des ombres (extrait de D4).

Grâce à l'action conjuguée de EC1L et de SK1L, l'objet O7, dont la forme séduisait B1L de prime abord, peut devenir un modèle pour les objets à venir par le fait que sa configuration initiale C– a été transformée en C+ et par le fait que ses propriétés Pe+Po– ont pu évoluer en Pe+Po+ par le déplacement d'un élément de cette forme, le trou, déplacement rendu possible par la validation du fait qu'EcCoGen-L n'est pas un programme mais une ressource.

Dans les secondes qui suivent cette interaction, O7 est déplacé en coup de cœur et sélectionné comme favori pour un nouveau calcul.

5.2.3.4 BILAN

Le bilan de l'observation d'EcCoGen-L est le suivant.

Des améliorations ergonomiques sont à mener à la fois pour éviter une charge cognitive inutile et pour préserver les utilisateurs d'erreurs potentielles dans la perception / sélection d'individus.

EcCoGen-L, même s'il est axé sur la performance d'individus (objets), peut soutenir la créativité en laissant les utilisateurs travailler sur des formes.

EcCoGen-L est un outil intéressant pour la créativité dès lors que les utilisateurs conservent la liberté de hiérarchiser les informations (les critères notamment). En revanche, il pèse sur la créativité par l'impossibilité qu'il y a de fixer des points. La place du supermarché aura gêné autant B1L que B2L dans leur démarche créative, les incitant à trouver des solutions pour tenter de "forcer" EcCoGen-L à fixer un espace au sol.

Toutefois, la plasticité du logiciel, dès lors qu'il est considéré comme une ressource par les utilisateurs, se révèle avantageuse car il laisse les utilisateurs percevoir des formes dans un empilement de blocs. Il est particulièrement intéressant de constater que les sujets ont évoqué des formes courbes (vague, chemin sinueux, fil qui tourne...) dans une forme composée de blocs rectangulaires. Comme s'ils récupéraient, de cette façon, leur fonction d'architecte créateur, capables de distinguer des formes complexes dans un environnement simplifié.

5.2.4 ECCOGEN-N DANS LE PROCESSUS CRÉATIF

La partie consacrée à EcCoGen-N sera plus courte que celle consacrée à EcCoGen-L du fait de la mobilisation très différente de cet environnement dans le processus créatif des sujets.

5.2.4.1 L'INTERFACE ECCOGEN-N ET SON UTLISATION

5.2.4.1.1 ÉLÉMENTS D'INTERFACE D'ECCOGEN-N

L'interface d'EcCoGen-N (Figure 48) a des similarités avec celle d'EcCoGen-L. Les neuf meilleurs individus y sont présentés, avec leurs caractéristiques en termes de performances énergétiques. Mais, à la différence d'EcCoGen-L, cette interface ne permet pas de configurer des paramètres tels que le nombre d'étages. Le nombre de pas calculés n'est pas non plus présent car le mode de calcul n'est pas le même entre les deux dispositifs. Cette interface est donc uniquement informative. Elle ne permet pas non plus de zoomer sur des individus ni de les voir dans leur environnement comme c'est le cas avec EcCoGen-L en vue V3D ou V3DZ. La seule opération possible sur cette interface est de faire pivoter chacune des vues indépendamment les unes des autres afin de les voir sous différentes faces.

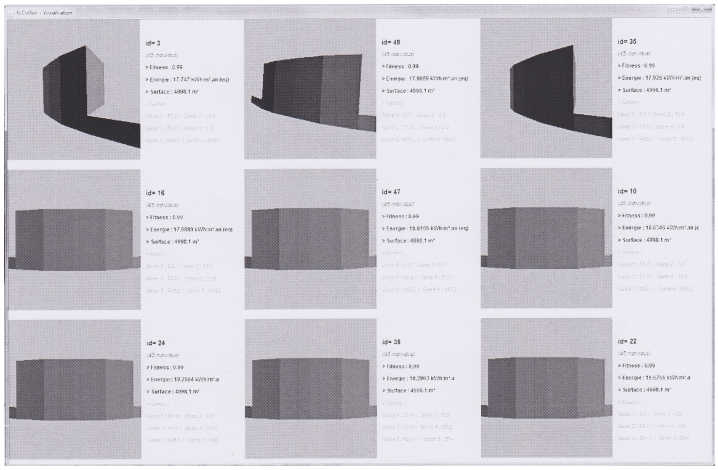


Figure 66. Interface EcCoGen-N.

EcCoGen-N est relié à deux autres environnements, Rhino et Grasshopper (Figure 49), qui nécessitent une maîtrise certaine pour pouvoir les manipuler (voir ce qu'en disent B1N et B2N lors du debriefing).

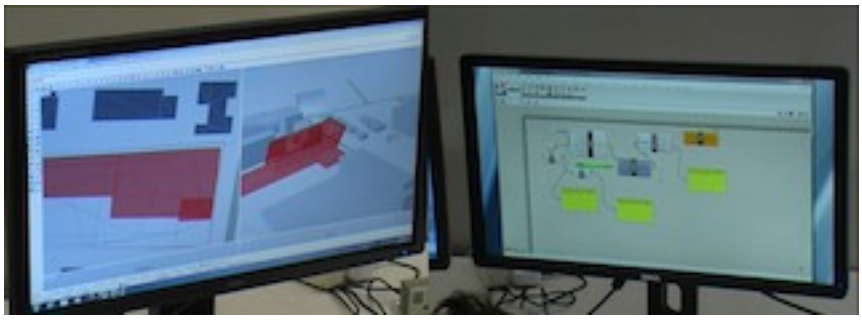


Figure 67. Environnement Rhino à gauche et Grasshopper à droite.

5.2.4.1.2 DIFFICULTÉS LIÉES AUX OUTILS

Les problèmes d'interface relevés dans EcCoGen-N sont les suivants.

– *Les ombres portées de l'environnement sur les individus et des individus sur l'environnement n'apparaissent pas*, ce qui gène les utilisateurs car ils sont obligés d'imaginer, dans les situations observées, les répercussions que le bâtiment qu'ils créent auront sur les constructions voisines. Avec toute la marge d'incertitude qui va avec.

– *Les résultats EcCoGen-N ne sont pas continus, de sorte que les utilisateurs doivent régulièrement rafraîchir l'écran pour que de nouveaux individus avec de nouvelles valeurs apparaissent*. Cela n'est pas une

erreur ergonomique, bien au contraire, car sinon les utilisateurs feraient face à une interface en perpétuel changement du fait du calcul en cours. Il est donc nécessaire qu'ils soient confrontés à une vue stable et qu'ils décident eux-mêmes de la faire évoluer pour prendre en compte les résultats des calculs en cours, mais cela pose deux sortes de problèmes.

D'une part, le bouton de rafraîchissement n'est pas sur l'interface elle-même, mais dans une boîte de dialogue flottante qu'il faut afficher à l'écran. Cela n'incite pas au rafraichissement.

D'autre part, les utilisateurs ne disposent pas d'espace pour mémoriser ou placer des individus qu'ils souhaitent conserver. Dans les deux cas observés, ils ont été contraints de noter ces objets ainsi que leurs performances sur une feuille pour non seulement en conserver la trace, mais aussi la forme. Le dessin D4 du B2N en est une parfaite illustration (Figure 50). Ajoutons que B1N a été confronté à un problème d'affichage des résultats sur EcCoGen-N durant plusieurs minutes (seuls deux à trois individus étaient affichés au lieu des neuf) pour la seule raison, découverte par hasard, que la fenêtre n'était pas suffisamment agrandie à l'écran. Durant ces longues minutes, RH2N a rafraîchi l'écran à de nombreuses reprises ou a tenté de voir si Grasshopper était correctement connecté.

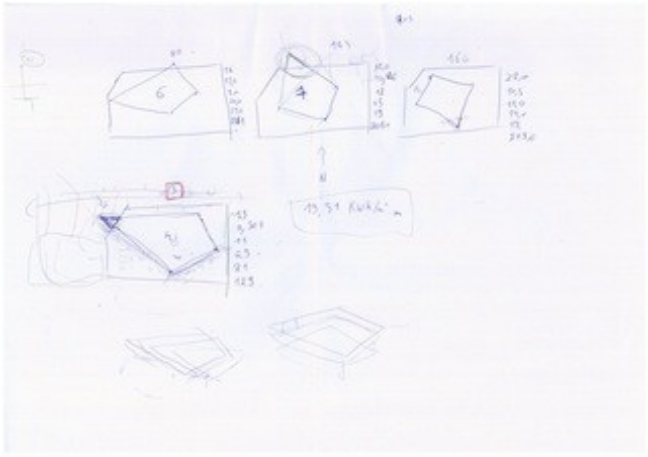


Figure 68. Conservation de 4 objets EcCoGen-N (Dessin D4).

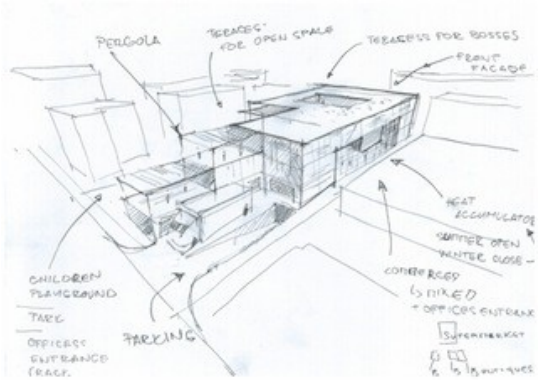
– *La vue des résultats dans EcCoGen-N est insatisfaisante selon B1N et B2N car elle ne permet pas de voir l'individu (objet) dans son environnement*. Pour cela, il faut sélectionner l'individu dans Rhino. Cette procédure n'est pas satisfaisante pour comparer rapidement des individus entre eux ou pour, plus simplement, les évaluer directement dans EcCoGen-N. Cet obstacle nous informe sur le fait quelles utilisateurs ne souhaitent pas seulement disposer d'informations sur la forme intrinsèque d'un individu isolé (sur leurs masses) ou sur ses performances énergétiques, contrairement à ce que laissent entendre les choix d'interface, mais qu'ils ont besoin de construire une compréhension sur les relations entre l'individu et son environnement. Cela rejoint les préoccupations analysées pour EcCoGen-L entre un outil considéré comme un programme ou comme une ressource.

– Enfin, *les binômes ont eu des difficultés d'affichage de résultats dans EcCoGen-N* parce que Grasshopper était mal connecté. Si l'on se reporte à la Figure 38, on observe quelques allers-retours entre Grasshopper et EcCoGen-N, avec une relance de calculs, durant près de quinze minutes entre 2h05 environ et 2h20 environ. Cela correspond au fait que *« les sliders n'était pas branchés »* (RH2N), ce que EC2N ponctue d'une exclamation *« ah les gogols ! »*. Or aucun retour d'information ne permet de savoir que les gênes ne sont pas branchés et, donc, qu'EcCoGen-N ne peut pas calculer de nouvelles générations.

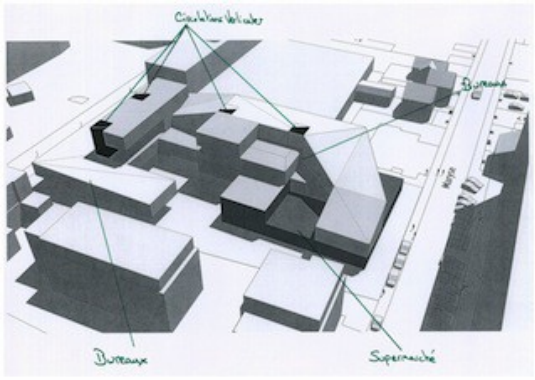
Ces points mériteraient d'être revus et améliorés dans une évolution d'EcCoGen-N afin d'en faciliter l'utilisation.

5.2.4.2 LE PROCESSUS CRÉATIF

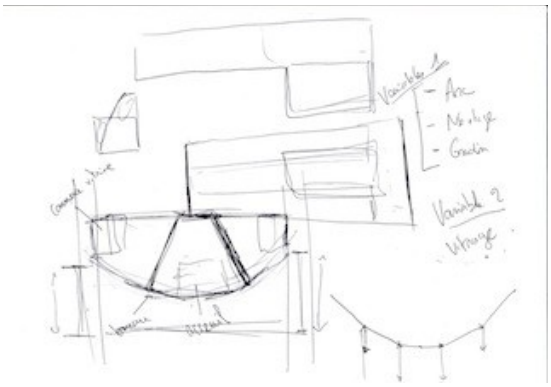
Si l'on compare les productions de binômes ayant travaillé avec EcCoGen-L et celles de ceux qui ont travaillé avec EcCoGen-N, on note des différences assez importantes. Voici des exemples caractéristiques de la production finale de chacun des binômes (Figure 51).



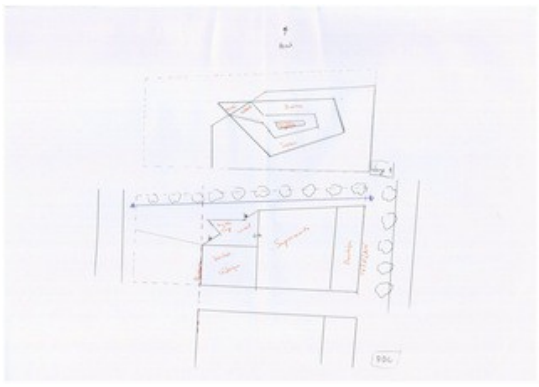
B1L – Esquisse en perspective annotée



B2L – Document Sketchup annoté



B1N – Esquisse en vue de dessus



B2N – Deux vues de dessus

Figure 69. Quatre objets exprimant les propositions finales des binômes.

5.2.4.2.1 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'ECCOGEN-N ACTUALISÉ PAR LES SUJETS

Les propositions EcCoGen-L semblent plus développées, plus abouties tant du point de la forme que de celui des fonctionnalités. Cela ne signifie pourtant pas qu'EcCoGen-N serait moins performant qu'EcCoGen-L, mais que les deux outils diffèrent dans leur conception et, donc, dans leur apport au processus créatif.

La contrainte qui a posé le plus de problème aux binômes confrontés à EcCoGen-L, c'est-à-dire la nécessité de placer une grande masse, celle du supermarché, au rez-de-chaussée est très vite évacuée avec EcCoGen-N. Dès les premières minutes B1N et B2N placent ce supermarché dans l'environnement avec l'outil Rhino. L'emplacement de cette masse étant défini, ils n'y reviendront quasiment plus et l'utilisation de Grasshopper puis d'EcCoGen-N aura pour fonction de travailler d'autres aspects : une façade courbe pour B1N, une tour

pour B2N.

Le principe de fonctionnement d'EcCoGen-L, tel qu'il est mis en œuvre par les sujets, consiste à concevoir des types de formes dans EcCoGen-L, que les utilisateurs cherchent à faire évoluer en fonction de contraintes et de critères qu'ils définissent en cours d'action. Par la suite, ils abandonnent EcCoGen-L pour faire évoluer ces formes dans un autre environnement, par exemple Sketchup, mais ce pourrait être aussi Rhino.

Le principe de fonctionnement d'EcCoGen-N, tel qu'il est lui aussi mis en œuvre par les sujets, consiste à définir une forme au préalable puis à faire tourner EcCoGen-N pour faire vivre cette forme. Cela a donné lieu à deux stratégies différentes pour B1N et B2N.

5.2.4.2.2 DEUX STRATÉGIES MISES EN PLACE

Ce principe de fonctionnement d'EcCoGen-N donne lieu a deux stratégies distinctes mises en place respectivement par B1N et B2N. Puisque EcCoGen-N est plutôt orienté sur l'approfondissement de projets dont les bases sont déjà posées, alors il permet soit de proposer des solutions créatives pour les éléments non définis, soit d'accompagner le développements de ces formes déjà pensées.

A. Cas de B1N

Très rapidement (0:03:30), B1N opte pour une forme de bâtiment qui sera soit en T soit en L. Au gré des discussions et des dessins une forme en C est évoqué sur la barre du L ou du T, que l'on retrouve dans la proposition finale (Figure 51). C'est ainsi qu'après 11 minutes, B1N s'accord sur le fait qu'ils ont *« la forme générale »* de leur bâtiment. Reste à développer les bureaux et en moins de 15 minutes le profil général de la forme est arrêté, qui allie toutefois entre le C et le T. Sur la Figure 38 on voit que le travail d'esquisse s'arrête à ce moment et qu'une phase de travail sur l'ensemble Rhino-Grasshopper débute qui mobilise le binôme pendant 25 minutes environ. Une nouvelle phase prend place au cours de laquelle on observe des allers et retours entre ces deux environnements et une activité d'esquisse (Figure 52 qui montre la forme en T créée sur Rhino).

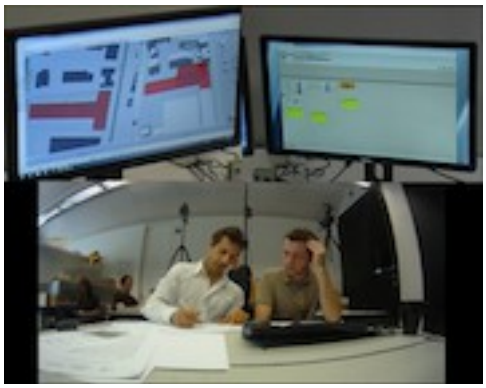


Figure 70. Discussion sur la forme du bâtiment (0:57:37).

Au cours de l'échange qui a lieu autour de la Figure 52, EC2N reprend l'idée du C pour transformer la forme en T actuelle et faire en sorte que la partie longue soit plus acceptable parce que, esthétiquement parlant, ce n'est pas satisfaisant. B2N est d'accord sur cet aspect. Comme c'était le cas avec EcCoGen-L, la forme étant discuté, la performance est évoquée, ici sous forme d'une hypothèse à vérifier avec EcCoGen-N selon laquelle la courbure du C améliorera peut-être la prise du soleil.

0:57:37

EC2N : et au dessus donc là *(dessinant)* t'aurais une espèce de supermarché en forme de croissant et peut-être ici droit et au-dessus les bureaux qui viennent comme ça

(geste de RH2N plutôt en accord)

EC2N : et là on se prend pas trop la tête mais si il faut y mettre des gradins on peut y mettre des gradins parce que là c'est trop:

RH2N : non ça va pas

EC2N : et puis on verra en plus c'est comme je te disais hier on verra si la courbe du soleil ça améliore les choses

RH2N : oui je suis okay là-dessus

Quelques minutes plus tard (1:07), une très longue séquence de paramétrage de Grasshopper est lancée pour dessiner cet arc. Elle dure plus d'une demi-heure parce qu'au sein de B1N, seul RH1N maîtrise ce logiciel, mais ne le maîtrise que partiellement.

Nous avons ici l'illustration de la stratégie de B1N qui a consisté à définir une forme au préalable et à recourir à EcCoGen-N pour répondre à une question posée sur les caractéristiques énergétiques de l'arc qu'ils ont imaginé ou sur l'utilité des gradins. EC2N l'a rappelé lors du debriefing : *« nous l'outil a beaucoup moins décidé de le forme »*. L'influence d'EcCoGen-N est alors relative à la fermeté des choix de conception réalisés.

– L'arc correspond à un choix ferme, argumenté, négocié, validé. B1N va chercher dans EcCoGen-N une solution optimale pour cet arc par rapport à l'état de leur projet.

– Les gradins sont une éventualité pour B1N. Ce que montre EcCoGen, c'est qu'ils ne sont pas performants dans l'état actuel du projet. Ils sont alors abandonnés.

B. Cas de B2N

La stratégie de B2N est différente. Tout comme leurs collègues, EC2N et RH2N définissent assez vite le rez-de-chaussée, là où se trouve le supermarché. Mais la phase de dialogue entre l'ensemble Rhino-Grasshopper et une activité d'esquisse est plus longue que pour B1N. Ce qu'ils font, c'est fixer des points qui vont structurer la forme, mais sans la contraindre (on est loin de l'équivalent de l'arc). On perçoit cette forme à la Figure 53 dans la partie de droite de l'écran Rhino.

Figure 71. Structuration de la forme au sein de B2N (1:19:48).

C'est cette forme fondée sur quatre points qui est soumise au calcul d'EcCoGen-N et qui va confronter B2N à divers choix qui apparaissent à la Figure 50. Une différence fondamentale réside dans ces deux états des étages surplombant le rez-de chaussée.

– *Anticipée par B2N et saisie dans Rhino-Grasshopper*, cette forme est prise dans l'espace vertical défini pour le rez-de-chaussée.

– Calculée par EcCoGen-N, en prenant donc en compte des critères énergétiques, cette forme déborde de cet espace, créant une pointe en surplomb du rez-de-chaussée.

Cette pointe est immédiatement identifiée et mobilisée par B2N comme étant un élément déterminant de l'originalité de leur projet. Pour autant B2N conserve la sensation d'avoir maîtriser le processus créatif : *« il a à peu près respecté la commande »* (RH2N, 1:35:05) et plus loin, toujours RH2N, celiui qui maîtrise Grasshopper au sein de B2N : *« finalement notre modèle il a bien marché »* (1:57:20).

Cela illustre la deuxième stratégie, celle qui consiste à fixer quelques éléments puis à recourir à EcCoGen-N pour proposer des formes, qui plus est des formes performantes d'un point de vue énergétique.

5.2.4.2.3 BILAN

Nous l'avons dit, EcCoGen-N est plus complexe, moins intuitif qu'EcCoGen-L dans sa mise en œuvre. Son appropriation par les utilisateurs est plus ardue et explique que, dans un même temps et pour un même projet, le niveau de définition des projets est moindre. B1N et B2N à qui nous avons présenté les résultats obtenus à Lyon en ont d'ailleurs convenus. En fin de séance avec B2N, quelques blagues ont été échangées sur le niveau du dessin présentant la solution. Cependant la pertinence d'EcCoGen-N est attestée dans un processus créatif pour au moins trois raisons.

– EcCoGen-N soutient des stratégies différentes d'utilisateurs. Dans un projet s'étalant sur une durée plus importante, ces deux stratégies peuvent être mises en place en fonction des objectifs poursuivis sur le moment. C'est là un résultat important.

– EcCoGen-N permet de stabiliser des points, qu'il s'agisse de définir une surface telle que le supermarché dans le projet observé ou qu'il s'agisse de contrainte des points autour desquels une forme pourra être générée. C'est un autre résultat important qui n'est pas résolu dans EcCoGen-L et pose problème aux utilisateurs de cet environnement.

– EcCoGen-N apparaît moins créatif qu'EcCoGen-L qui, justement parce qu'il part de zéro, peut générer des individus dans lesquelles les utilisateurs vont lire des formes plus ou moins complexe. Cependant, EcCoGen-N soutient ce processus créatif en assurant les utilisateurs de la pertinence de la forme créée (*cf.* les propos de B2N lors du debriefing).

5.2.5 PERSPECTIVES DE DÉVELOPPEMENT

A l'origine de ce projet, une question se posait à laquelle nous (l'ensemble des partenaires) souhaitions pouvoir répondre. Comment construire un outil qui fasse la part belle à l'aléatoire inhérent aux processus évolutionnaire et propose des solutions écologiquement efficace et qui ne contraignent pas le processus créatif des élèves architectes ? Nous souhaitions que l'outil soutienne cette activité créative mais n'impose pas de solution. Les sujets de ces expériences contribuent à donner une réponse à cette question, de plusieurs manières.

– *Ils nous disent le contrôle qu'ils souhaitent conserver dans le processus créatif*. Cela s'observe à la fois dans leurs propos lors du debriefing et dans leurs activités en situation. Lorsque B2L est confronté à un objet préféré, mis en coup de cœur, et qu'il découvre que les performances des objets coup de cœur n'évoluent pas et ne sont pas comparables aux performances des objets de la génération en cours, alors immédiatement, il

identifie un objet de forme proche dans la génération courante qui va “remplacer” l’ancien objet. C’est aussi toute l’activité de B1L et B2L qui consiste à sélectionner des objets pour influencer autant qu’ils le peuvent les générations suivantes. Ce besoin de contrôle est aussi exprimé dans la différence entre EcCoGen-N et EcCoGen-L. Dès lors que les sujets sont confrontés à un outil de type EcCoGen-N, ils en “profitent” pour définir strictement des formes, pour contraindre points et restreignent l’utilisation de l’outil à une fonction “d’ingénieur” proposant des objets écologiquement performants.

– *Les sujets nous disent aussi que le processus créatif est un processus plastique*, qui s’adapte aux outils proposés. Nous n’avions initialement pas prévu de tester deux environnements différents, mais un seul. Cette contrainte, issue de l’histoire du projet, a permis non pas de comparer, mais d’observer deux situations de conception architecturale ayant un même objectif servi par deux outils dont les principes ne concordent pas tout à fait. Il en ressort une observation certainement plus riche (même si plus lourde) car elle montre exactement le poids de l’outil dans le processus créatif et les moyens mis en œuvre par les sujets pour s’adapter, c’est-à-dire déformer l’outil pour l’intégrer dans leurs propres pratiques. Ce point, crucial en psychologie ergonomique demanderait à être développé plus avant. Le matériel constitué lors de ces deux sessions de travail devrait pouvoir le permettre.

– *Les sujets confirment enfin le poids du collectif et de la manipulation d’objets dans la créativité*. Certes, ils disent lors des debriefings qu’il leur semble que leur créativité personnelle est quelque peu bridée par le fait d’avoir travaillé en binôme, ce qu’ils expliquent par la nécessité de faire du consensus. Mais ce qu’ils réalisent dans les sessions de travail est autre chose. Dans l’exemple du point 9.3.3, nous avons montré l’entrelacement de la dynamique cognitive et créatrice. Cet exemple n’est pas le seul et l’on observe à de nombreuses reprises ce jeu interactionnel au cours duquel l’activité créatrice et les levées d’obstacles se nourrissent d’une négociation fine et médiée par les objets (événements à l’écran ou dessins).

Les perspectives de développement, au-delà des améliorations ergonomiques indispensables que nous avons relevées, sont donc guidées par ces trois dimensions principales :

plasticité de l’environnement qui doit permettre de soutenir des stratégies diverses ;

accent sur la capacité des utilisateurs à comprendre les relations entre les différents individus, les différentes générations, les différents critères de performance ;

nécessité de conduire une réflexion sur le dispositif socio-technique global, comprenant certes l’environnement numérique lui-même, mais aussi les conditions et les objectifs de son utilisation, surtout si l’on songe à une utilisation dans un cadre pédagogique.

6 CONCLUSION

6.1 DISCUSSIONS, ENJEUX ET PROLONGEMENTS :

6.1.1 ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX ET SOCIÉTAUX

On peut imaginer que ces outils faciliteront la conception de bâtiments éco-performants, en intégrant dès le début de la conception les contraintes environnementales du contexte. Ils pourraient trouver une place de choix dans l'enseignement. Les logiciels pourraient également faciliter le dialogue entre architectes et ingénieurs, entre architectes et maîtres d'ouvrage. La même famille d'outils pourrait intéresser également les spécialistes de l'aménagement urbain.

6.1.2 ENJEUX EN TERMES D'INSTRUMENTATION DE LA CONCEPTION

L'utilisation de mécanismes génératifs reste émergent dans les environnements logiciels. Nos travaux montrent l'importance de proposer des modes d'interaction et de représentation simples. La dimension ergonomique des interfaces participe de manière prégnante à la compréhension du problème et à l'activité cognitive de l'utilisateur. Le basculement d'un modèle transformationnel à un modèle génératif ne doit pas retomber dans les affres d'une surcharge contextuelle et cognitive des interfaces.

De plus, les processus évolutionnaires sont caractérisés par la construction de populations d'individus et par le maintien d'un nombre important d'analogons évoluant à travers les générations et les populations de solutions. Des figurations phylogénétiques de ces individus et des modalités de représentation, d'interaction et de compréhension du comportement global des populations pourraient avantageusement faciliter l'activité du concepteur. Cette prise de connaissance globale et cette posture de conception se concentrant sur une population d'hypothèses restent largement inexplorés dans sa dimension ergonomique.

6.1.3 FORMES ET PERFORMANCES : DU PRIMAT DE LA FORME SUR LA PERFORMANCE À UNE MISE EN RELATIONS ENTRE FORMES ET PERFORMANCES

L'analyse des données collectées à travers les expérimentations, confirme que la conception architecturale se fait de la forme vers la performance. Si de prime abord, la performance pourrait être un critère de décision permettant de conserver ou non la forme en question, la réalité de l'activité se révèle plus complexe. En effet l'analyse du processus de choix des formes fait ressortir trois étapes caractéristiques. Les concepteurs passent tout d'abord par l'identification d'une contrainte programmatique compatible avec les analogons et les propositions formelles de l'outil. Dans un second temps les analogons générés sont interprétés et les concepteurs construisent une connaissance liant forme et performance. Ainsi des archétypes morphologiques, voire des éco-modèles, sont identifiés par les concepteurs et ces configurations formelles deviennent des caractères à conserver au fil des générations. La troisième étape de sélection des analogons opère une hiérarchisation des critères de performance. Cette hiérarchisation reste subjective et commande les choix et le regard des concepteurs. L'activité créative du concepteur repose sur la mise en relation de contraintes programmatiques, de niveau de performances énergétiques et de solutions formelles. L'importance des critères de performance pourrait trouver une place plus importante par un renforcement des indicateurs. Dans cette hypothèse une conception de la performance vers la forme pourrait être envisagée. La forme architecturale pourrait alors apparaître comme une résultante d'un processus de conception initié par une intention de performance.

6.1.4 SUR LE PLAN DES OUTILS PROTOTPYAUX DÉVELOPPÉS :

Nos outils restent à un stade de développement prototypal et leur diffusion semble difficile. La brique « éco-modèle » de Ec-Co-Gen-N pourrait relativement facilement trouver une place en enrichissant les plug- in grasshopper disponibles. Cependant l'intégralité du système Ec-Co-Gen-N, incluant moteur d'évaluation et moteur génératif, reste difficile à déployer hors contexte expérimental. Le système d'information Ec-Co-Gen-L est pour sa part construit sur une série de passerelles entre logiciels spécialisés et son déploiement en est complexifié. Mais de nouveaux développements sont prévus dans le cadre de projets en attente de financement.

6.1.5 SUR LE PLAN MÉTHODOLOGIQUE :

Nous avons choisi une méthode de développement linéaire allant d'une spécification technique à une phase d'expérimentation en passant par le développement prototypal. Cette trajectoire de projet a connu un dédoublement dans le développement de deux solutions logicielles.

Ce dédoublement s'explique par des distinctions fortes dans les postures de conception et nos outils révèlent des attitudes singulières qui reposent sur deux caractéristiques. D'une part face aux éco-modèles, le premier outil repose sur la déclinaison et l'exploration de variantes d'éco-modèles explicitement identifiés. Le second outil mobilise la notion d'éco-modèle dans la capacité du dispositif génératif à faire émerger une configuration identifiée par le concepteur, configuration que le concepteur cherche ensuite à maintenir ou prolonger au fil des générations. D'autre part, si les univers référentiels participent inévitablement des processus de conception architecturaux, l'outils ec-co-gen-N les convoque de manière concrète et directe, ec-co-gen-L pour sa part opère de manière plus abstraite à travers une ré-interprétation morphologique des analogons proposés sous forme de voxels. Ces approches relèvent de postures de conception différentes et nous n'avons pas souhaité arbitrer entre ces deux stratégies pour privilégier une démarche parallèle. Ce choix méthodologique a contribué à une explicitation des caractéristiques de conception en permettant une confrontation et une comparaison des outils et processus associés.

L'inscription du projet dans une boucle de conception cyclique autorisant une première itération spécifications-développement-expérimentations-critiques puis une deuxième et troisième itérations intégrant les améliorations identifiées auraient pu participer à la mise au point de systèmes d'information plus aboutis. De plus une méthode de conception centrée utilisateurs aurait peut-être permis d'identifier plus rapidement les limites ergonomiques des solutions.

6.2 CONCLUSION

Le projet a conduit à la construction d'une connaissance importante sur la thématique, les différents états de l'art, les apports et originalités du projet devraient contribuer à l'avancement des savoirs sur les questions identifiées.

Le projet a conduit au développement de deux systèmes d'information de type génératif qui ont été supports des expérimentations. Si la maturité de ces outils reste à un stade expérimental, il est prévu que leurs composants soient remobilisés dans des développements connexes ou des prolongements directs.

De manière générale le projet a contribué à la structuration des équipes, d'une part en stimulant une démarche interdisciplinaire et un partage des savoirs entre architectes, informaticiens et cogniticiens, le croisement des points de vue ayant largement bénéficié au projet. D'autre part, le projet a permis le renforcement interne et la structuration de certaines équipes.

7 LISTE DES ACTEURS MOBILISÉS PAR LE PROJET

7.1 LABORATOIRE MAP-CRAI - ECOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE NANCY

Pr Jean-Claude Bignon – Enseignant Chercheur

Dr Gilles Duchanois – Enseignant Chercheur

Pr Gilles Hallin – Enseignant Chercheur

Mathieu Lamour – Ingénieur d'Etudes

Aude Mourier puis Gregori Stocky– Secrétariat

Gregoire Thille ,Ingrid Tockler, Julien Meyer - Stagiaires

7.2 LABORATOIRE MAP-ARIA - ECOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE LYON

Hervé Lequay – Enseignant Chercheur

Dr Philippe Marin – Enseignant Chercheur

Dr Xavier Marsault – Chercheur

Dr Lazaros Mavromatidis – Chercheur

Renato Saleri – Chercheur

Florent Torres – Stagiaire

7.3 CODISANT-SITCOM, INTERPSY - UNIVERSITÉ NANCY 2

Dr Nicolas Gregori – Enseignant Chercheur

Dr Christian Brassac – Enseignant Chercheur

Lara Schmitt – Ingénieur d'Etude

8 LISTE DES PUBLICATIONS

8.1 FRANCE, PUBLICATIONS MONO-PARTENAIRE :

Gregori, N., Fixmer, P., & Brassac, Ch. (2011). Vers la conception de dispositifs socio-techniques dans le domaine de la conception architecturale. Actes du colloque Epique'2011. Metz, 5-7 septembre.

Schmitt, L., Gregori, N., & Brassac, Ch. (2012). Observer la créativité : une proposition méthodologique. Actes du Séminaire SCAN'12. Paris - La Villette, 21-22 juin.

8.2 FRANCE, PUBLICATIONS MULTI-PARTENAIRES :

Marin P. , Marsault X., Saleri R., Duchanois G., Bignon JC. (2012). L'Eco-Conception Générative : Une illustration de la pensée complexe, SCAN12 : Séminaire de Conception Architecturale Numérique, Complexité(s) des Modèles de l'Architecture Numérique, Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Paris La Villette, France

8.3 INTERNATIONAL, PUBLICATIONS MULTI-PARTENAIRES :

Marin P. , Marsault X., Saleri R., Duchanois G. (2012). Creativity with the help of evolutionary design tool, ECAADE : Digital Physicality | Physical Digitality, Czech Technical University, Faculty of Architecture, Prague, Czech

8.4 INTERNATIONAL, PUBLICATIONS MONO-PARTENAIRE :

Marin P., Marsault X., Mavromatidis L., Saleri R., Torres F. (2013). Ec-Co-Gen : An evolutionnry simulation assisted design tool for energy rating of buildings in early design stage to optimize the building form, IBPSA13, Le bourget du lac, France (en cours)

Marsault X. (2013). A multiobjective and interactive genetic algorithm to optimize the building form in early design stages, IBPSA13, Le bourget du lac, France (en cours)

Lazaros E. Mavromatidis, Hervé Lequay ; Heterogeneous parameter investigation of dynamic building envelope's thermal insulating performance. CLIMA 2013, 11th REHVA World Congress & 8th International Conference on IAQVEC : Energy Efficient, Smart and Healty Buildings, Prague, Czech Republic, 16-19 June 2013.

8.5 INTERNATIONAL, REVUE À COMITÉ DE LECTURE :

Lazaros Elias Mavromatidis, Anna Bykalyuk, Hervé Lequay, Development of polynomial regression models for composite dynamic envelopes' thermal performance forecasting, Applied Energy, Volume 104, April 2013, Pages 379-391, ISSN 0306-2619, 10.1016/j.apenergy.2012.10.045.

8.6 ACTIONS DE DIFFUSION, CONFÉRENCES DE VULGARISATION :

Marin P., Eco-Conception Générative, Séminaire sur le Design Morphogénétique à l'Institut Rhône-Alpin des Systèmes Complexes (IXXI), le 19 juin 2012, Lyon

Marin P., Eco-Conception Générative, Séminaire UMR MAP, Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Lyon, les 4-5-6 avril 2013, Lyon

9 TABLE DES ILLUSTRATIONS

FIGURE 1. PAYSAGE DES SOLUTIONS.....14

FIGURE 2. LIFE SPACIES 1997-1999.....15

FIGURE 3. VUE DE L'INTERACTION TACTILE AVEC E-VOLVER.....16

FIGURE 4. CAPTURE DU FILM AUTOMAPPE.....17

FIGURE 5. GALAPAGOS 1994.....18

FIGURE 6. EXEMPLES DE RÉSULTATS DE GÉNÉRATION D'IMAGES STYLISÉES. .19

FIGURE 7. INTERFACE ET REPRÉSENTATION DU DAG.....20

FIGURE 8. INTERFACE ET EXTRAIS DE PORTRAITS.....20

FIGURE 9. INTERFACE DE GENOTYPE.....20

FIGURE 10. POPULATION DE SOLUTIONS ET INTERFACE.....21

FIGURE 11. INTERFACE ET POPULATION DE SOLUTIONS.....21

FIGURE 12. INTERFACE DU LOGICIEL.....22

FIGURE 13. INTERFACE ET VUE DES RÉSULTATS DANS LA SCÈNE 3D.....30

FIGURE 14. VUE DES RÉSULTATS DANS LA SCÈNE 3D.....31

FIGURE 15. RÉSULTAT ET SIMULATION.....32

FIGURE 16. INTERFACE.....33

FIGURE 17. RÉSULTATS.....35

FIGURE 18. PASSERELLES ENTRE LES DIFFÉRENTS ENVIRONNEMENTS LOGICIELS.....36

FIGURE 19. EXEMPLE DE PAYSAGE DE RECHERCHE D'UNE FONCTION D'UNE SEULE VARIABLE, AVEC UN SEUL EXTREMUM GLOBAL (ROUGE) ET PLUSIEURS EXTREMA LOCAUX (VERT).....42

FIGURE 20. SCHÉMA GÉNÉRAL D'UN ALGORITHME ÉVOLUTIONNAIRE (SOURCE : PIERRE COLLET, COURS DE L'ECOLE POLYTECHNIQUE, 2007).....49

FIGURE 21. FRONT(S) DE PARETO ET RANGS DE PARETO POUR UN PROBLÈME DE MINIMISATION À DEUX OBJECTIFS. (A) LES POINTS EXTRÉMAUX DE L'ENSEMBLE DE L'ESPACE DE RECHERCHE FORMENT LE FRONT DE PARETO

DU PROBLÈME. (B) UNE POPULATION DONNÉE EST PARTIELLEMENT ORDONNÉE PAR LA RELATION DE DOMINANCE AU SENS DE PARETO.....52

FIGURE 22. ALGORITHME PAR ESTIMATION DE DISTRIBUTION (EDA).....57

FIGURE 23. OBJETS DE RECHERCHE ET NIVEAU SOCIAUX EN FONCTION DES DISCIPLINES TRAITANT DE LA CRÉATIVITÉ. EXTRAIT DE (KAHL ET AL., 2009)..79

FIGURE 24. PROCESSUS D'INNOVATION SELON MIDLER (1996).....83

FIGURE 25. DÉVELOPPEMENT DE LA SOLUTION EN FONCTION DES AXES DE PHASAGES, RAFFINEMENT ET CONCRÉTISATION. D'APRÈS DARSES (2007).....87

FIGURE 26. REGROUPEMENT DE FIGURES ÉLÉMENTAIRES DANS UNE FIGURE D'ORDRE SUPÉRIEUR.....102

FIGURE 27. REGROUPEMENT DE FIGURES ÉLÉMENTAIRES DANS UNE FIGURE D'ORDRE SUPÉRIEUR.....102

FIGURE 28. REGROUPEMENT PAR PROXIMITÉ.....102

FIGURE 29. REGROUPEMENT PAR SIMILARITÉ FAISANT APPARAITRE DES DIAGONALES.....102

FIGURE 30. REGROUPEMENT PAR PROXIMITÉ ET SIMILARITÉ.....102

FIGURE 31. LES FORMES CLOSES SONT LUES COMME DES FIGURES.....102

FIGURE 32. RECONSTRUCTION DE LA CONTINUITÉ.....102

FIGURE 33. LA SYMÉTRIE DU T EST PERÇUE PLUS NATURELLEMENT QUE L'ASYMÉTRIE DU L.....102

FIGURE 34. FORME ET MOUVEMENT, GÉNÉRATEUR ET TRAJECTOIRE.....105

FIGURE 35. STRATÉGIE DE CONCEPTION ARCHITECTURALE (CHING, 2007).....106

FIGURE 36. EXEMPLES D'OPÉRATEURS DE TRANSFORMATION (MITCHELL & MCCULLOUGH, 1991).....106

FIGURE 37. EXEMPLE DE TRANSFORMATION PAR COMPOSITION. (MITCHELL & MCCULLOUGH, 1991).....107

FIGURE 38. DIFFÉRENTES RÉSOLUTIONS D'UNE TOMOGRAPHIE D'UNE MOUSSE À BASE D'AMIDON.....142

FIGURE 39. EXEMPLE DE REPRÉSENTATION D'UN MATÉRIAU SOUS COMPRESSION.....142

FIGURE 40. MAISON REPRÉSENTÉE PAR DES CUBES DE 10 CM (D'APRÈS BEMIS, 1936).....144

FIGURE 41. LAVA, VOXEL, EXTENSION POUR L'ÉCOLE D'ARCHITECTURE DE STUTTGART, 2009. TROIS DIAGRAMMES DÉCRIVANT LES PRINCIPES GÉNÉRATIFS : 1) ATTRIBUTION DES FONCTIONS 2) EMPILEMENT DES CELLULES 3) DISTRIBUTION DU PROGRAMME.....144

FIGURE 42. MAQUETTE DE LA CHAISE T1-M, APRÈS 860 GÉNÉRATIONS.....145

FIGURE 43. VUE EN PLAN DU DÉCOUPAGE PARCELLAIRE.....146

FIGURE 44. POSSIBLES GÉNÉRATIONS ET INTERPRÉTATION MATÉRIELLES...147

FIGURE 45. RÉSULTATS.....148

FIGURE 46. 1) VOLUME CAPABLE. 2) POSSIBLE INSTANCIATION.....149

FIGURE 47. COURBES D'EFFICIENCE.....153

FIGURE 48. MÉTHODE DES DEGRÉS JOURS UNIFIÉS.....153

FIGURE 49. SCHÉMA SYNTHÉTIQUE D'ECCOGEN.....154

FIGURE 50. ORGANIGRAMME DÉTAILLÉ D'UNE ITÉRATION DE L'ALGORITHME GÉNÉTIQUE.....161

FIGURE 51. EVALUATION AUTOMATIQUE DES FITNESS D'UN ANALOGON DANS L'ENVIRONNEMENT DE CALCUL RHINICÉROS / GRASSHOPER.....162

FIGURE 52. VUE D'ENSEMBLE DE L'INTERFACE AVEC LES ÉLITES AFFICHÉES, LES COUPS DE CŒUR ET LE MONITORING.....164

FIGURE 53. VUE PERSPECTIVE DE L'INTERFACE AVEC VISUALISATION D'UNE SOLUTION DANS SON SITE.....165

FIGURE 54. EXEMPLE D'OPTIMISATION SUR 3 OBJECTIFS ÉNERGÉTIQUES – ÉLITES DU FRONT DE PARETO ET 4 INDIVIDUS-CIBLES SÉLECTIONNÉS DANS LES PREMIÈRES ITÉRATIONS POUR L'IGA.....166

FIGURE 55. RÉPONSES AU QUESTIONNAIRES POST-SESSION (SÉRIES 1 = LYON ; SÉRIES 2 = NANCY).....188

FIGURE 56. DÉROULEMENT DES QUATRE SESSIONS DE TRAVAIL.....190

FIGURE 57. VUE DES 9 INDIVIDUS (V9).....197

FIGURE 58. VUE 3D D'UN INDIVIDU SÉLECTIONNÉ, SELON DEUX ANGLES (V3D). 198

FIGURE 59. VUE 3D EN ZOOM D'UN INDIVIDU SÉLECTIONNÉ (V3DZ).....198

FIGURE 60. TEMPS TOTAL ET MOYEN DANS CHACUNE DES VUES POUR B1 ET B2. 201

FIGURE 61. PROPORTION DES TEMPS DANS CHACUNE DES VUES POUR B1L ET B2L.....201

FIGURE 62. OBJET O7 ÉVALUÉ PAR EC1L.....207

FIGURE 63. EXTRAIT DU CALQUE D4.....207

FIGURE 64. OBJET 7 EN VUE V3D.....209

FIGURE 65. POSITIONNEMENT DU TROU, CAPTATION DU SOLEIL ET PROJECTION DES OMBRES (EXTRAIT DE D4).....209

FIGURE 66. INTERFACE ECCOGEN-N.....211

FIGURE 67. ENVIRONNEMENT RHINO À GAUCHE ET GRASSHOPPER À DROITE. 211

FIGURE 68. CONSERVATION DE 4 OBJETS ECCOGEN-N (DESSIN D4).....212

FIGURE 69. QUATRE OBJETS EXPRIMANT LES PROPOSITIONS FINALES DES BINÔMES.....213

FIGURE 70. DISCUSSION SUR LA FORME DU BÂTIMENT (0:57:37).....214

FIGURE 71. STRUCTURATION DE LA FORME AU SEIN DE B2N (1:19:48).....215